



Implémentation matérielle du système de Synchronisation d'Horloge à Quatre Canaux pour le Convertisseur A/N du Radiohéliographe de Nançay

Hardware Implementation of Quad-channel Clock Synchronization System for Nançay Radioheliograph A/D Converter

El Houssain Ait Mansour¹, Karl-Ludwig Klein¹, Stéphane Bosse¹ and Severin Barth

¹Observatoire de Paris, Station de radioastronomie de Nançay, Route de souesmes, 18330 Nançay, France

Email: eaitmansour, ludwig.klein, bruno.dasilva, stephane.bosse, severin.barth, ludwig.klein@obspm.fr

Mots-clefs: Synchronisation des Horloges, Calibration, Implémentation Matérielle

Keywords: Clocks Synchronization, Calibration, Hardware Implementation

Résumé:

La synchronisation est un problème majeur dans les réseaux distribués et distants, y compris l'interférométrie radio. La précision du système de synchronisation dans un réseau d'antennes en interférométrie radio dépend de la bande passante analogique du signal acquis. Peu de protocoles de synchronisation existante peut assurer une précision inférieure à la nanoseconde. Dans ce document, on va présenter les premiers résultats obtenus d'Implémentation matérielle du premier prototype d'un algorithme de synchronisation appliqué à quatre horloges.

Abstract: The synchronization is a major problem in distributed networks, including radio interferometry. The accuracy of the synchronization system in radio interferometry depends on the analog bandwidth of the acquired signal. However, few of previous synchronization protocols can provide sub-nanosecond precision. In this document, we will present the first results obtained from Hardware Implementation of the synchronization algorithm dedicated for four clocks.

1 Introduction

La synchronisation d'horloges est un problème important dans l'infrastructure des réseaux distribués, y compris l'interférométrie radio [1]. De nombreux algorithmes de synchronisation du temps ont été développés auparavant, mais peu d'entre eux peuvent atteindre la précision des sous-ns dans les réseaux distribués [2, 3, 4, 5]. En outre, plusieurs sources d'erreurs de système limitent la précision, tels que les retards asymétriques, les retards de propagation, le nombre de noeuds et d'autres sources de retards induites par la méthode de mesure. Le Radiohéliographe de Nançay [6] est un réseau d'antennes analogiques radio qui se composent de 48 antennes multi-réparties. Il permet de construire des images radio de la couronne solaire dans la bande de fréquence 150-450 MHz [7]. Les signaux Radio Fréquence (RF) sont transportés dans des câbles coaxiaux avec des longueurs différentes (50 m à 3,2 km) des antennes au récepteur. Les principales limitations de l'instrument actuel sont les erreurs de retards d'offsets introduites par l'étalonnage manuel entre chaque antenne et le récepteur. En outre, le temps de commutation entre chaque fréquence analysée introduit une latence dans les images solaires, elle réduit également le rapport signal sur bruit. Le système de synchronisation proposé du nouveau NRH numérique nécessite une fréquence d'horloge du convertisseur A/D de 1 GHz au minimum pour chaque antenne (échantillonnage pour une bande complète). Ce nouveau système permettra d'acquérir simultanément des images radio [8] à différentes fréquences. Avec une résolution configurable. Les principaux problèmes de ce système sont : la distribution de l'horloge haute fréquence requise pour chaque antenne, les différentes longueurs de câbles entre les antennes individuelles et le récepteur, qui nécessitent une synchronisation de temps globale avec une précision de l'ordre de la sous-ns.

L'objectif de ce travail est de parvenir d'illustrer les résultats préliminaires du premier prototype de 4 quatre antennes. Nous proposons, dans un premier temps, les besoins réels en performance de synchronisation demandés par le système actuel en comparaison avec les instruments existants. On terminera avec la description de l'architecture matérielle proposée et les résultats.

2 Spécification de système de synchronisation de nouveau NRH

Dans cette section, on va introduire les principales caractéristiques techniques des imageurs radios existants qui fonctionnent dans des bandes de fréquence d'observations allant jusqu'à 950 GHz (ALMA dans la bande 10). L'étude comparative se focalise sur la bande numérisée et la précision requise de synchronisation des horloges. Le tableau 1 illustre la bande numérisée ainsi des divers instruments. Elle est pour la plupart des imageurs radio inférieure à 100 MHz (Tab. 1). Elle est égale à 2 GHz pour les deux instruments ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) et EVLA (Expanded Very Large Array) avec une bande d'observation allant de 31,3 GHz à 950 GHz. Ce choix est dû à la complexité technique du système du numériseur, distribution et synchronisation des horloges hautes fréquences.

TABLE 1 : La bande de base des instruments radio

Instrument	Bande numérisée (MHz)
NRH	0,7
LOFAR	30-250
EMBRACE	30-250
GMRT	16
ATA [9, 10]	100
EVLA [11, 12]	2000
ALMA [13, 14, 15]	2000
LWA [16, 17]	80

La précision minimal d'ajustement des horloges de numériseur (Convertisseurs A/D) des instruments existants est illustrée dans la Table. 2. On constate que la précision augmente avec l'augmentation de la bande numérisée : LOFAR (78 ps pour une bande maximale de 250 MHz), ALMA (15,62ps, 2 GHz). On conclut une numérisation large bande consiste une contrainte majeure de la mise en oeuvre du système de synchronisation des horloges multi-reparties. On déduit, d'après la Table. 2 que la précision requise par le nouveau NRH est égale à 50,74 ps.

TABLE 2 : La précision requise des horloges pour les divers instruments

Instrument	Précision (ps)
RH	23364
LOFAR	78
EMBRACE	78
EVLA	15,62
ALMA	15,62
Nouveau RH : Par rapport à ALMA/EVLA	$15,62 \cdot 500/2000 = 62,48$
Nouveau RH : Par rapport à LOFAR/EMBRACE	$78 \cdot 250/500 = 39$
Nouveau RH : Moyenne	50,74

La distribution des horloges haute fréquence à faible gigue pour les convertisseurs A/D intégrés aux pieds des antennes nécessite une synchronisation globale du système. La désynchronisation est induite par la différence de longueur entre les antennes (50 m-1200 m) et le système centrale ainsi à l'asymétrie des canaux. Le NRH actuel est constitué d'un réseau de 48 antennes radio multi-reparties [18] dédiée à l'imagerie de la couronne solaire. D'après l'étude [19], les courbes de la figure 2 illustrent l'évolution de l'erreur différentielle $d\tau_g$ en fonction de tau de corrélation pour chaque fréquence. Le tau de corrélation $r(\tau_g)(\%)$ est normalisé par rapport à la puissance. Il diminue avec l'augmentation de l'erreur par contre l'erreur diminue avec l'augmentation de la fréquence. La précision du système de synchronisation (décalage entre les horloges) à 5% de perte de tau de corrélation est égale à 112 ps, elle est à 50 ps à 1 % (figure 2) pour une fréquence maximale de 450 MHz. La précision requis par le système à 1% est quasiment identique à la précision déduite en comparaison avec les imageurs (voir la Table. 2).

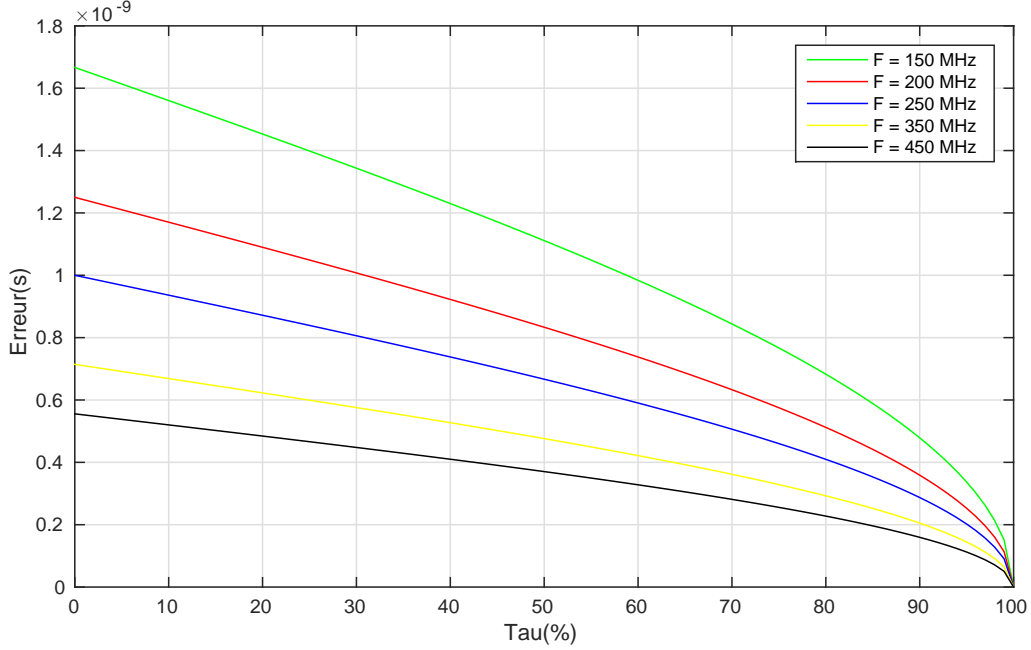


FIGURE 1 : L'erreur différentielle $d\tau_g(s)$ en fonction de tau de corrélation $r(\tau_g)(\%)$ [19]

3 Description de l'architecture proposée à quatre canaux

Le système complet de calcul et de l'ajustement pour 4 canaux (horloges) indépendants (4 antennes/esclaves) en est illustré dans la figure 2. L'objectif du système est la mesure et l'estimation en temps réel des écarts d'ajustement puis l'application de ses derniers pour chaque horloge en se basant sur l'algorithme illustré dans les travaux [20, 21] effectués précédemment. La boucle de mesure et d'ajustement est constituée des éléments suivants :

- un TDC (Time-to-Digital Converter)[22, 23, 24] : Un circuit de mesure du retard aller/retour d_{MM}^i pour chaque canal.
- un DTC (Digital-to-Time Converter)[25] : Plusieurs circuits d'ajustement des offsets des horloges de hautes précisions.
- un bloc d'acquisition : Une Unité d'acquisition des retards mesurés pour chaque canal et le transfert des mesures à l'ordinateur pour l'analyse et le traitement différés. Au même temps, l'interface d'acquisition est utilisée pour la mesure en temps réel des retards.
- un bloc SyncEv : Générateur des intervalles de temps T_i programmable et du signal "Start" (Sync) permet de synthétiser des intervalles du temps fixes durant la phase de calibration.
- un bloc Calibration Calcul & Ajustement : Unité de calibration des retards, des calculs des écarts d'ajustements et du transfert des écarts au circuit à retard programmable (DTC)
- Slave : Noeud dans le réseau modélisant une antenne.

La calibration est la première phase ((1), Figure. 3) qui permet de compenser l'effet des retards accumulés dans le chemin aller-retour des horloges. La figure 4 illustre les différents délais dans un trajet aller-retour entre le maître et l'esclave. On distingue trois délais : T_i : Intervalle du temps générée par FPGA, la durée de ce dernier est connue d'avance elle est générée par le générateur des événements, d_0^i : La somme des retards instrumentales accumulés dans la chaîne, due généralement au temps de propagation des divers composants dans le chemin aller-retour, d_1^i : Retard induit par la longueur du câble, d_{MM}^i : Mesure du retard global (du maître au maître) du circuit TDC et la somme des retards dans le chemin. Durant la phase de calibration, l'effet du retard du câble d_1^i est supprimé en utilisant des câbles avec des longueurs connues et identiques conçus spécialement à cet effet dans le chemin aller-retour des signaux START et STOP. Par conséquent, la mesure du TDC d_{MM}^i (Eq. 1) est réduite à $T_i + d_0^i$, donc on peut facilement déduire la valeur d_0^i à partir de la mesure de d_{MM}^i et par la

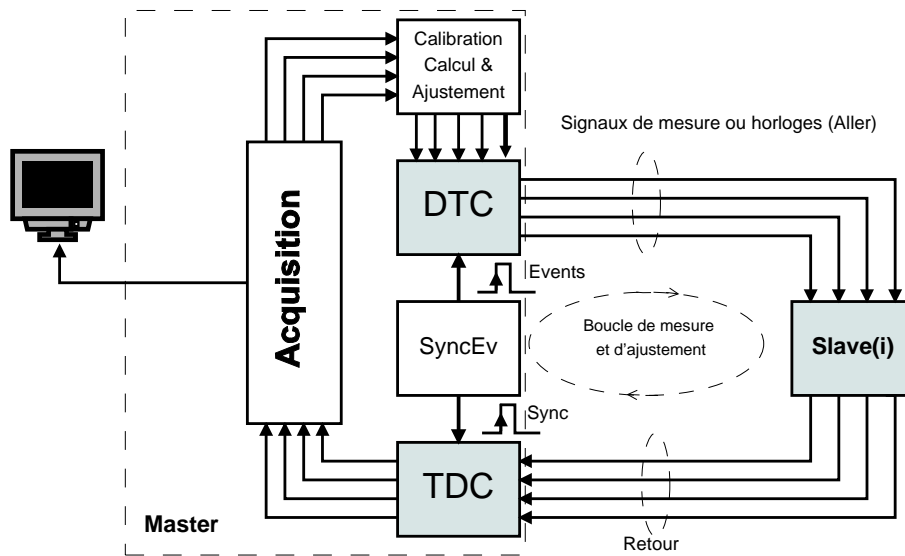


FIGURE 2 : Schéma bloc du système de mesure et d'ajustement des offsets des horloges.

connaissance préalable du T_i . L'opération de tri ((2), Figure. 3) est la première étape durant l'implémentation sur de l'algorithme de calcul des écarts d'ajustement d_{xi} . Pour objectif de trier les mesures de telle manière à obtenir des valeurs différentielles positives pour chaque couple d'antennes $(i, i + i)$. Par conséquent, obtenir des écarts d_{xi} (3) positifs qui seront intégrés dans un circuit à retard programmable de haute précision (DTC)(5).

$$d_{MM}^i \sim T_i + d_0^i \quad (1)$$

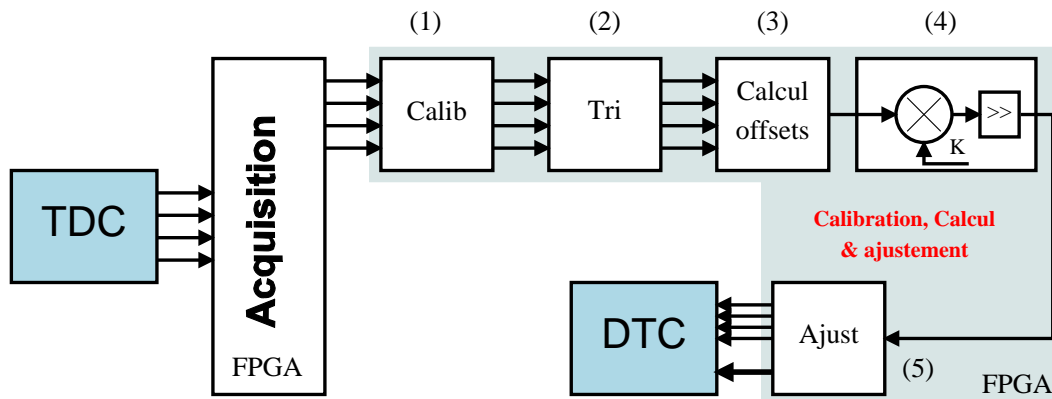


FIGURE 3 : Schéma bloc de circuit de calcul et ajustement des horloges. (1) : Circuit de calibration. (2) : Tri des mesures pour le circuit de calcul d'ajustement afin d'obtenir des écarts d'ajustements positifs. (3) : Algorithme de calcul des offsets fin d'obtenir la synchronisation des canaux. (4) : Conversion des mesures du TDC au DTC (adaptation des résolutions binaires). (5) : Transfert multiplexé des écarts d'ajustement aux circuits DTC.

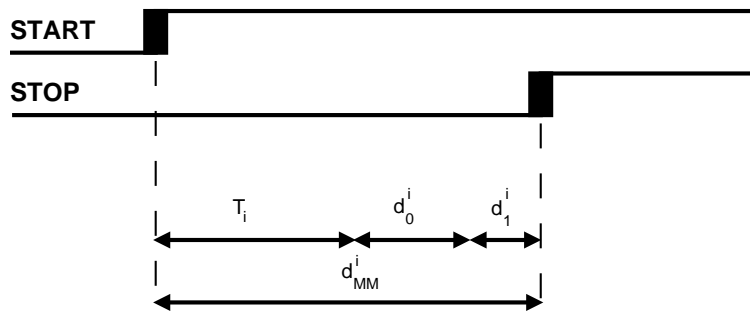


FIGURE 4 : Chronogrammes des retards dans un trajet aller-retour.

4 Résultats

Pour valider le fonctionnement du système illustré dans la Figure. 2, on considère les liaisons de même distances entre le maître et les esclaves. La longueur du câble du signal "Start" (Sync) entre le FPGA et le TDC est égale à la longueur du câble aller+retour du signal Stop afin de réduire l'erreur due aux câbles des deux signaux. Le maître envoie des intervalles de temps T_i (l'intervalle du temps entre le front montant des signaux "Start" et le front montant du "Stop") contrôlés par la carte FPGA (générateur des T_i) pour les quatre canaux, puis on récupère les résultats des mesures via l'interface d'acquisition. On a effectué des fenêtres de mesure sur 10 secondes pour les divers modes de mesures (voir la Table. 4). Le maître utilisée une horloge de référence à 200 MHz avec un "skew" inférieure à 50 ps (6 sigma) comme il es illustré dans la Figure. 5.

La Figure. 6 montre l'estimation moyenne du retard induit par la chaîne en fonction du mode pour chaque canal. Le retard est compris entre 250 ps et 5 ns. Il est minimal pour le canal 1 (A) et maximal pour le canal 4 (D). Le retard croit en fonction du canal et du mode comme il est illustré précédemment. La précision maximale du système après calibration est inférieure à 2 ps et quasiment constant en fonction des modes avec un skew inter-canaux inférieure à 0,5 ps.

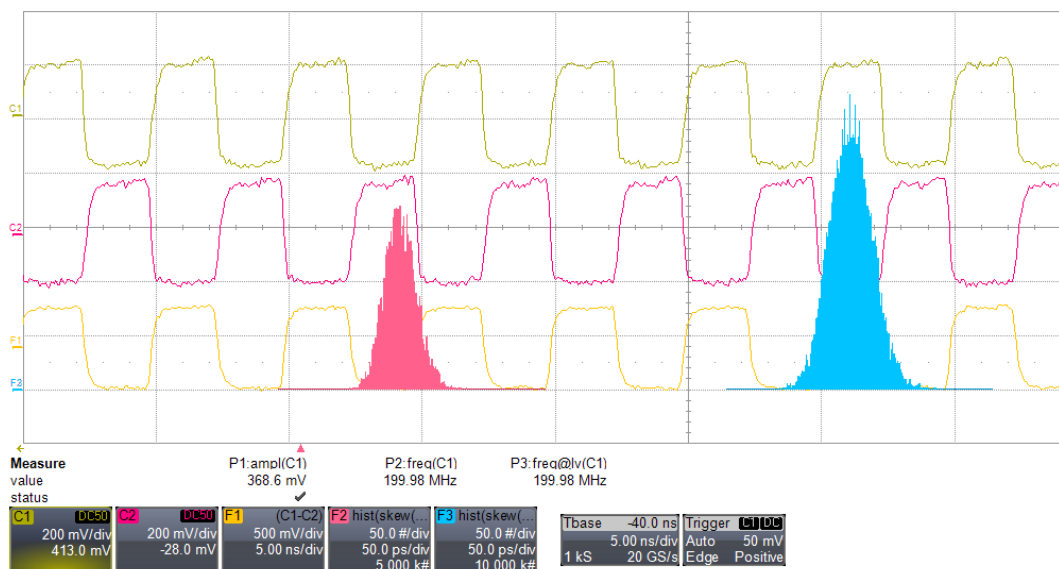


FIGURE 5 : Gigue de l'horloge de référence au niveau du maître à 200 MHz. La distribution (rose) indique le skew entre C1 et F1 (50 ps/div, 200 mV/div). La distribution (bleue) indique le skew entre C2 et F1 (50 ps/div, 500 mV/div).

Les résultats du système de calibration montrent la compensation des divers retards induits par la chaîne de mesure. On a constaté également la compensation des retards induits par le générateur des intervalles de temps pour chaque canal. La précision du système après calibration est inférieure à 3 ps dans le cas de d'utilisation d'une horloge avec une gigue de 50 ps (6 sigma) (voir la figure 5). De plus, le circuit de calibration permet d'obtenir des mesures précises malgré l'utilisation des signaux brouillant (Start et Stop avec une gigue supérieure à 200 ps (6 sigma)) et le non respect de la contrainte sur l'horloge du circuit TDC (gigue inférieure à 3 ps). La Table.

3 résume les performances et limitations de la technique proposée en comparaison avec les autres méthodes de synchronisation. Note méthode est plus compatible et optimisée à la topologie des antennes du NRH (étoile). Les simulations montrent une précision inférieure à 50ps avec la minimisation de l'effet de l'asymétrie du canal. La précision préliminaire mesurée est de l'ordre de la nanoseconde de l'architecture globale du système de synchronisation

TABLE 3 : Caractéristiques de la technique proposée. (*) : Précision Simulée dans le cas symétrique, (**) : Précision Simulée dans le cas asymétrique, (***) : Précision mesurée sans minimisation de l'erreur.

	Complexité (1)	Minimisation (2)	Asymétrie (3)	Type de mesure	Adaptabilité	Précision
Technique proposée	Minimal	Ajustement périodique Avec minimisation	Réduction de l'effet de l'offset du à l'asymétrie	Mesure unique au niveau du maître	Optimisé pour la topologie étoile des antennes	Simulée(*) : 0 ps Simulée(**) : <30 ps Mesurée(***) : < 2 ns
WR	Élevée Couches 1,2	Ajustement périodique	Supposé symétrique	Deux mesures	Générique	< 500 ps Augmente avec la longueur
PPT	Élevée Couches 1,2	Ajustement périodique	Supposé symétrique	Deux mesures	Générique	350 ns Augmente avec la longueur
PPS	Élevée Couches 1,2	Ajustement périodique	Supposé symétrique	Deux mesures	Générique	100 ns Augmente avec la longueur

TABLE 4 : Intervalles du temps $T_i(\mu s)$ pour les quatre canaux A à D en fonction du mode du générateur de signaux Start et Stop

Mode/Canal	A	B	C	D
2	5.12	10.24	15.36	20.48
3	10.24	20.48	30.72	40.96
4	20.48	40.96	61.44	81.92

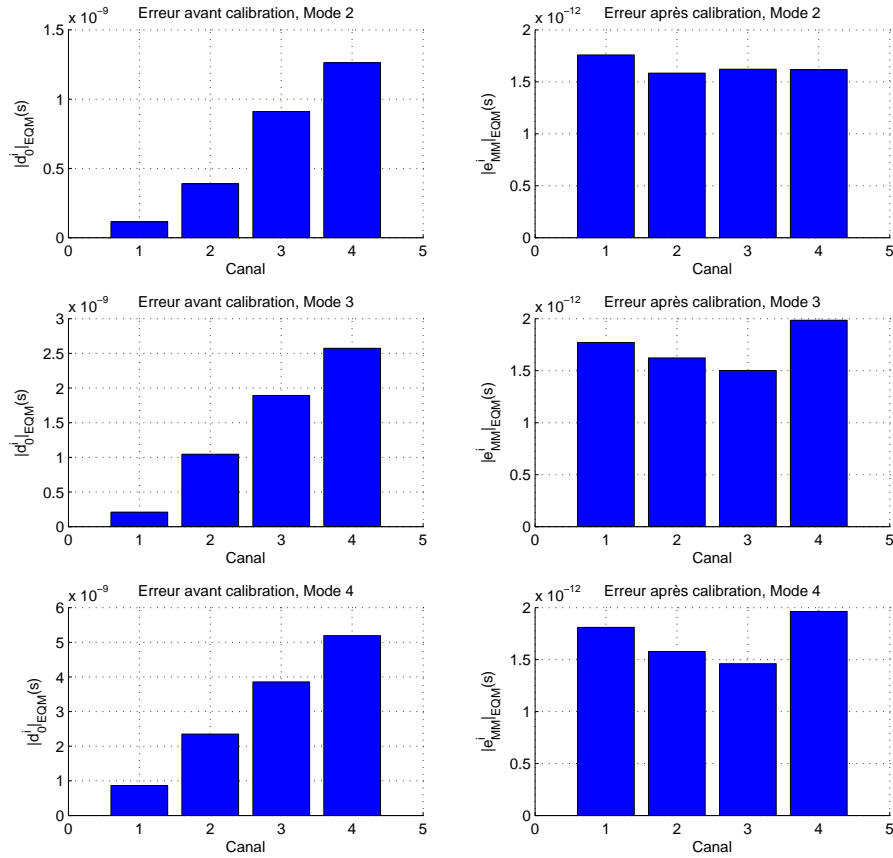


FIGURE 6 : Erreur quadratique moyenne(EQM) avant et après la phase de calibration pour les modes (2,3 et 4) pour les quartes canaux.

5 Conclusion

Les résultats du système de synchronisation en particulier la calibration montrent la compensation des divers retards induits par la chaîne de mesure. On a constaté également la compensation des retards induits par le générateur des intervalles de temps pour chaque canal. La précision du système après calibration est inférieure à 3 ps dans le cas de d'utilisation d'une horloge avec une gigue de 35 ps (1 sigma). Elle est de 2 ps dans le cas d'utilisation d'une horloge ayant une gigue inférieure à 5 ps (1 sigma). On conclut que la précision après calibration augmente avec la qualité de l'horloge utilisée. De plus, le circuit de calibration permet d'obtenir des mesures précises malgré l'utilisation des signaux brouillant (Start et Stop avec une gigue supérieure à 200 ps (6 sigma)) et le non respect de la contrainte sur l'horloge du circuit TDC (gigue inférieure à 3 ps). La précision préliminaire mesurée est de l'ordre de la nanoseconde de l'architecture globale du système de synchronisation sans minimisation [20]. a précision finale sera meilleure avec l'intégration de l'algorithme de minimisation de l'erreur en utilisant la structure LMS (Least Mean Square)[26, 27]. De plus, les circuits de mesure et ajustement (TDC et DTC) ne sont pas optimaux, une Implémentation sur FPGA (IP disponible) avec une précision inférieure à 20 ps peut augmenter la précision et rendre le système plus flexible et performant [28, 29].

6 Références

- [1] A. T. S. T. M. Colegate and R. B. Wayth, "Characterization of a low-frequency radio astronomy prototype array in western australia," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015.
- [2] H. Weibel, "High precision clock synchronization according to ieee 1588 - implementation and performance issues," *Embedded World*, pp.22-24, 2005.
- [3] I. F. I. Sousa and A. Klautau, "Analysis and evaluation of end-to-end ptp synchronization for ethernet-based fronthaul," *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2016 IEEE*, 2016.

- [4] A. M. R. Exel and T. Sauter, "Delay and jitter characterization for software-based clock synchronization over wlan using ptp," *IEEE Trans. Industrial Informatics* 10 (2) : 1198-1206, 2014.
- [5] C. S. S. Zug and J. Kaiser, "Uncertainly aware hybrid clock synchronization in wireless sensor networks," *UBICOMM2014 : The Eighth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies*, 2014.
- [6] K.-L. Klein and A. Kerdraon, "Solar physics at nançay radio observatory : Recent developments," *IEEE General Assembly and Scientific Symposium*, 2011.
- [7] A. Kerdraon and J.-M. Delouis, "Coronal physics from radio and space observations," *IEEE General Assembly and Scientific Symposium*, 2011.
- [8] A. K. M. P. S. H. Y. Wang and D. Haggerty, "The coronal and heliospheric 2007 may 19 event : coronal mass ejection, extreme ultraviolet imager wave, radio bursts, and energetic electrons," *The American Astronomical Society*, 2010.
- [9] D. B. A. Bauermeister and al., "The allen telescope array the first widefield, panchromatic, snapshot radio camera," *Radio Astronomy Laboratory, University of California Berkeley CA, USA*, 2009.
- [10] W. Urry, "The ata imager update," *URSI Meeting, Boulder, CO*, 2004.
- [11] R. P. P. N. J. J. B. B. Carlson and al., "The expanded veryz large array," *Proceedings of the IEEE | Vol. 97, No. 8*, 2009.
- [12] R. Perley, "The expanded very large array new capabilities for new science," *National Radio Astronomy Observatory NRAO*, 2012.
- [13] R. E. Hills and A. J. Beasley, "The atacama large millimeter/submillimeter array," *ALMA, Av El Golf 40, Piso 18, Santiago, Chile*, 1995.
- [14] A. W. . K. Y. Lo and al., "The atacama large millimeter/submillimeter array development program," *Activity White Paper for Astro2010 Program Prioritization Panel*, 2010.
- [15] L. R. D'Addario, "Timing and synchronization," *ALMA Memo No. 298*, 2000.
- [16] S. E. T. Clarke and al., "The long wavelength array," *Proceedings of IEEE*, 2009.
- [17] G. B. Taylor, "Science with the long wavelength array," *The Metrewavelength Sky ASI Conference Series, 2014, Vol. 13, pp 349 354*, 2014.
- [18] T. R. Hunter and P. J. Napier, "Antennas and receivers in radio interferometry," *Proceedings of the 2014 Synthesis Imaging Workshop held in Socorro, NM on May 13-20*, 2014.
- [19] E. A. M. K.-L. K. B. D. Silva and al., "Nancay radioheliograph a/d converter specifications for solar corona observation and clocks synchronisation system accuracy computation," *Observatoire de Paris, Station de Radioastronomie de Nançay, Projects : Time Synchronizatio*, 2016.
- [20] E. A. M. B. D. Silva and al., "Sub-nanosecond time synchronization mechanism for radio interferometer array," *2017 IEEE International Workshop on Measurement and Networking (M and N) 27-29 Sept*, 2017.
- [21] E. A. M. B. D. Silva and al., "Global time synchronization mechanism for radio interferometer network," *2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS) 9-13 July*, 2017.
- [22] G. S. Jovanovic and M. K. S. cev, "Verniers delay line time to digital converter," *Scientific Publications of the State University of Novi Pazar ser a Appl Math Inform and Mech vol 1, 1 2009, 11 :20*, 2009.
- [23] C. H. Lin and M. Syrzycki, "Single stage vernier time to digital converter with sub gate delay time resolution," *Circuits and Systems, 2011, 2, 365 :371*, 2011.
- [24] T. Instruments, "Ths788 quad-channel time measurement unit (tmu)," *SLOS616D*, 2015.
- [25] O. Semiconductor, "Mc10ep195, mc100ep195 programmable delay chip,"
- [26] C. S. T. O. et al., "Fpga implementation of lms-based fir adaptive filter for real time digital signal processing applications," *2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, 2015.

- [27] X. D. H. L. et al., "High-speed fpga implementation of an improved lms algorithm," *2013 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, 2013.
- [28] J. Z. P. C. et al., "Low-cost fpga tdc with high resolution and density," *IEEE Transactions on Nuclear Science, Journal of Instrumentation*, vol. 12, pp. P07028, 2017, ISSN 1748-0221., 2017.
- [29] J. K. Y. W. et al., "A 128-channel high performance time-to-digital converter implemented in an ultrascale fpga," *NSS Poster Session I*, 2017.