

Réception de la fréquence porteuse de France Inter Asservissement en fréquence et en phase d'oscillateurs

B. DUBOUIS

Centre National d'Études des Télécommunications

Résumé

L'utilisation de la réception de l'onde porteuse de l'émission de France Inter grandes ondes permet de réaliser sur une grande partie du territoire métropolitain français, des dispositifs de contrôle et d'asservissement d'oscillateurs locaux avec de bonnes performances.

Des asservissements en fréquence avec une précision meilleure que 10^{-11} peuvent être obtenus. Des synchronisations de phase peuvent permettre une précision de l'ordre de 60 ns.

Abstract

Using the received carrier of the France Inter emitter makes it possible, on a great part of the French Metropolitan territory, to develop performing devices intended to control and lock local frequency oscillators.

Frequency locked loops with an accuracy better than 10^{-11} are obtainable. Phase synchronization allows an accuracy on the delivered signals of approximately 60 ns.

La fréquence porteuse de l'émission de France Inter grandes ondes 162 kHz est, non seulement pilotée par un oscillateur atomique à césium, mais sa phase, à l'émission, est également asservie sur une phase de référence provenant du même césium. Voir l'exposé : France Inter, l'émetteur français de fréquence étalon et de signaux de temps codé. Cela confère à cette émission une qualité toute particulière qui permet de disposer, sur tout le territoire métropolitain, d'une référence de fréquence et de phase qui peut être très utile pour un grand nombre d'applications.

Nous exposerons dans cette communication un principe original de réception de cette « phase » étalon et de son utilisation au contrôle et à l'asservissement d'oscillateurs locaux de différentes qualités.

Avec l'utilisation d'un asservissement de phase, nous disposons alors, même avec des oscillateurs de performance moyenne (donc aussi de coût moyen), d'un pilote de fréquence d'une qualité capable par exemple de permettre à une horloge de garder à long terme, l'exactitude qu'elle avait à son initialisation sous réserve toutefois de certaines conditions que nous expliciterons.

1. Réception de la fréquence porteuse de France Inter

Les caractéristiques de l'émission de France Inter sont les suivantes :

- fréquence 162 kHz, qui lui donne les qualités et défauts de la propagation des ondes longues ;
- modulation d'amplitude du programme radio-phonique. Le taux de modulation n'est « limité » qu'à 100 %, ce qui entraîne que, suivant « l'intensité sonore » du programme radio, le niveau de la porteuse peut être quelquefois très réduit voire nul ;
- modulation de phase du codage des signaux horaires ;
- puissance d'émission variable ;
- arrêt hebdomadaire d'environ 4 heures pour entretien ;
- potentialité d'arrêt accidentel.

Une bonne exploitation de la phase de France Inter nécessite de disposer d'un oscillateur local à la réception.

A partir de cet oscillateur, dont la fréquence peut être quelconque, des signaux de fréquence sont synthétisés pour permettre la comparaison, dans des conditions acceptables, avec la fréquence reçue à 162 kHz.

Un bon moyen d'éliminer les fréquences de modulation qui sont ajoutées sur la porteuse, est d'effectuer des mélanges à des fréquences intermédiaires plus basses. Il est alors plus facile de filtrer ces fréquences de modulation par des moyens classiques.

Après le ou les mélanges intermédiaires, quelle que soit la fréquence finale de comparaison de phase, une période complète (un tour de phase) de celle-ci représente une période complète de la fréquence porteuse.

L'onde reçue a un certain bruit de phase qui va limiter la sensibilité de détection du phasemètre. Un millième de période nous est apparu comme une valeur adéquate de l'écart minimum de phase qu'il était nécessaire de détecter et un phasemètre a été réalisé, qui signale tout écart de phase supérieur à cette valeur, qui correspond donc à un écart de phase de 6 ns entre les signaux à 162 kHz.

L'écart de phase détecté est corrigé par action sur la synthèse du signal local qui sert à la comparaison. Cette synthèse a en effet la possibilité de fournir un signal de fréquence avec 1 000 pas de phase possible.

Cette résolution de détection et de correction de 6 ns va entraîner un certain temps d'attente entre deux détections- corrections d'écart de phase unitaire, successifs, suivant l'écart des fréquences entre l'oscillateur local et France Inter.

Ainsi 1 seconde est nécessaire à cette attente si les deux fréquences sont à $6 \cdot 10^{-9}$, mais il faudra 60 secondes si elles sont à 10^{-10} , 10 minutes si elles sont à 10^{-11} , 1 heure 40 minutes si elles sont à 10^{-12} .

Le nombre de corrections de phase que l'on effectue, peut être traité de différentes manières, pour permettre plusieurs applications que nous allons détailler.

2. Contrôle de fréquence d'oscillateurs locaux

Le nombre des corrections de phase dont on connaît également la valeur est totalisé dans un compteur.

La visualisation, l'enregistrement graphique ou le traitement micro-informatique de ce total ou plutôt de sa variation dans le temps, donnent l'écart de fréquence que l'on cherchait à mesurer.

La variation du total n'est bien sûr effective que s'il y a détection d'écart de phase. Le contrôle d'une fréquence demandera donc un temps d'observation

proportionnel à la qualité de l'exactitude de cette fréquence.

La comparaison de fréquence avec France Inter demande bien évidemment que la réception de ce dernier soit de bonne qualité. Effectivement, si la fréquence et la phase de France Inter sont asservies sur un « Césium » au départ de l'émission, à la réception, ces données peuvent être entachées d'erreurs qui ont pour origine diverses sources. La première étant les aléas de la propagation qui interviennent différemment suivant l'éloignement de l'émetteur, les perturbations climatiques, les périodes de la journée, les phénomènes d'évanouissement dans certaines régions éloignées (interférence entre onde de sol et onde de ciel), la puissance d'émission. La seconde est plus liée à l'exploitation de l'émetteur tel que les arrêts de l'émission, arrêts hebdomadaires ou accidentels, ou les changements de configurations d'antennes.

Les conséquences de la première série de perturbations peuvent être résolues par l'augmentation du temps d'observation, avant de définir l'écart de fréquence mesuré, ou la prise en compte de cette observation, limitée à certaines périodes de la journée. Les conséquences de la deuxième série sont résolues par une bonne interprétation des résultats et ici un enregistrement graphique permanent des données du totalisateur renseigne plus précisément et plus rapidement que le traitement informatique des données.

Une observation de plusieurs jours de réceptions successifs permet de chiffrer les perturbations apportées par la propagation.

En notre laboratoire du CNET à Bagneux, environ 250 km au nord de l'émetteur, la précision de la réception peut être estimée à $\pm 10^{-7}$ par seconde et cela quelle que soit la période d'observation ; pendant la seule période diurne, cette précision est de l'ordre de $\pm 2 \cdot 10^{-8}$.

Un contrôle de fréquence à 10^{-10} demandera donc 1 000 s, 10^{-12} sera obtenu sur une journée.

Il est à noter que pour des localisations plus perturbées, en particulier celles où se produisent des phénomènes d'évanouissement, ces phénomènes sont souvent cycliques (tombée et levée du jour, période nocturne, manque de niveau de réception consécutif à une baisse de puissance d'émission) et que pendant les périodes de bonne réception, on retrouve la phase de France Inter dans le même état que si elle avait suivi son évolution sans perturbation de propagation, et ainsi des contrôles sur une journée ou sur plusieurs jours sont encore possibles avec une précision de 10^{-12} ou mieux.

Rappel

L'exactitude de la fréquence de France Inter est publiée mensuellement dans le bulletin H du Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences de l'Observatoire de Paris.

Un exemple d'application de ce contrôle de fréquence, est le suivi de la synchronisation du réseau

numérique des télécommunications. Cette synchronisation est réalisée à mieux que 10^{-11} de la fréquence étalon international. Et pour mesurer à « 10^{-11} près » dans tous les coins de France, ou il faut disposer de nombreux oscillateurs atomiques très coûteux, ou il faut recevoir France Inter et comparer sa fréquence à celle utilisée pour synchroniser le réseau des télécommunications. C'est ce qui est réalisé avec ces « contrôleurs » de fréquence. Dans cette application, les récepteurs n'ont pas d'oscillateur propre ; c'est à partir du rythme à contrôler à 2 048 kHz que sont synthétisés les signaux servant à la comparaison.

3. Asservissement en fréquence d'oscillateurs locaux

Les corrections de phase nécessaires à la remise en phase du signal local de comparaison à France Inter, peuvent aussi, outre leur totalisation et enregistrement, être traitées électroniquement pour effectuer un asservissement de fréquence de l'oscillateur local.

La mesure du temps qui sépare deux corrections de phases successives, dans le même sens, donne après division de la valeur connue de la correction de phase, par ce temps, l'écart effectif des deux fréquences.

Il est alors intéressant de convertir cette mesure en la variation de tension qu'il faudra appliquer à l'asservissement de l'oscillateur, pour compenser l'écart de fréquence trouvé. L'oscillateur doit bien entendu pouvoir être asservi par une tension extérieure, les oscillateurs à quartz commandables par tension, VCXO, et les oscillateurs atomiques à rubidium feront de très bons oscillateurs pour cette application.

Pour se protéger des « perturbations » de France Inter, (voir 2) il est judicieux de n'effectuer des corrections de fréquence qu'après détection et correction d'un certain nombre d'écarts unitaires de phase dans un même sens. Il est aussi très important de ne commencer un comptage de ce nombre de corrections, que si les signaux comparés sont initialement en phase.

Ce dernier point permet de limiter à un, le nombre de correction de fréquence, en particulier lors de sauts de phase de la porteuse consécutifs à un changement de puissance (rappel : ces sauts biquotidiens sont corrigés à l'émission dans un temps inférieur à 12 secondes) ou à un changement (assez rare) de configuration d'antennes. Il permet également une plus grande rapidité de calage en fréquence, en particulier à la remise en route de l'oscillateur local après un arrêt d'alimentation par exemple.

Le nombre de corrections de phase que l'on compte avant correction de fréquence va limiter la précision de la fréquence asservie, car il faut attendre plus longtemps entre chaque correction de fréquence, et si

l'on fait l'hypothèse de linéariser la dérive des oscillateurs, plus on attend avant de corriger, plus la fréquence s'est éloignée. (L'asservissement est fait pour donner à l'oscillateur une fréquence exacte mais aussi pour compenser le phénomène de vieillissement de celui-ci).

Avec un dispositif comptant 8 corrections de phase unitaire de 6 ns, dans un même sens, nous aurons pour divers oscillateurs de coefficient de vieillissement différent, une fréquence asservie dont l'écart avec la fréquence de France Inter ne devrait jamais être supérieur aux valeurs données dans le tableau suivant :

Coefficient de vieillissement Écart maximal
(donné par le constructeur) de la fréquence asservie

Rubidium	$5 \cdot 10^{-12}$ /mois	$5 \cdot 10^{-13}$
	10^{-11} /mois	$7,5 \cdot 10^{-13}$
	$2 \cdot 10^{-11}$ /mois	$1 \cdot 10^{-12}$
Quartz	10^{-11} /jour	$5 \cdot 10^{-12}$
	10^{-10} /jour	$1,5 \cdot 10^{-11}$
	$5 \cdot 10^{-10}$ /jour	$2,7 \cdot 10^{-11}$
	10^{-9} /jour	$3,5 \cdot 10^{-11}$
	10^{-6} /an	$5 \cdot 10^{-11}$
	10^{-5} /an	$2 \cdot 10^{-10}$

Les résultats figurant dans ce tableau ne sont valables que pour des critères de vieillissement. Toutes variations de fréquence de l'oscillateur dues à d'autres causes ne sont pas prises en compte. Les variations de fréquence provoquées par des variations de température peuvent être bien plus importantes, si l'on ne prend pas quelques précautions de thermostatage.

Les valeurs données ne sont valables que pour un asservissement effectif continu. En absence de réception de France Inter (l'arrêt hebdomadaire de 4 heures par exemple), l'asservissement est bloqué sur la dernière tension corrigée, l'oscillateur prenant alors son régime autonome. A la reprise de la réception de France Inter, il est à nouveau réasservi avec la précision mentionnée dans le tableau.

La variation de la tension d'asservissement étant inversement proportionnelle au temps mis à la détection des écarts de phase unitaire, la « vitesse » de l'asservissement sera assez rapide. Ainsi pour les oscillateurs mentionnés dans le tableau, après avoir été mis en route (chauffage des thermostats) depuis 30 minutes, la fréquence de sortie est asservie dans les limites du tableau en un temps inférieur à 30 minutes pour les quartz, et à 2 heures pour les rubidium.

De tels asservissements de fréquence peuvent être utiles dans les applications où un besoin d'exactitude de fréquence est souhaité et où, la rapidité de mise en service est une condition importante : pilotage de synthétiseurs de fréquence, d'appareils de mesure, etc.

4. Synchronisation en phase d'oscillateurs locaux

Les oscillateurs asservis en fréquence comme précédemment, peuvent, bien évidemment, piloter des échelles de temps ou des signaux de fréquence avec repère de phase précis, mais l'exactitude de ces signaux va être dégradée par les écarts de fréquence de l'oscillateur. En effet, nous avons vu qu'un oscillateur asservi en fréquence sur France Inter à l'instant t n'aura de correction d'asservissement que quand sa phase (à 162 kHz) se sera écartée de celle de France Inter d'une certaine valeur — 8 fois 6 ns dans l'exemple soit 48 ns. La correction compensant alors l'écart de fréquence correspondant, ceci ne permet pas de rattrapper les 48 ns perdues pendant le temps de la mesure. Pour compenser cette perte, il faudrait qu'il y ait sur-compensation de fréquence d'une valeur égale à l'écart de fréquence détecté et cela pendant une durée du même ordre que le temps de détection. Tout cela semble difficile à réaliser.

Pour obtenir des signaux de temps ou de phase de meilleure précision, nous avons réalisé un autre dispositif qui utilise la qualité de la phase de France Inter. (Nous avons vu que cette phase est asservie sur celle d'un signal provenant d'un oscillateur atomique à césium et que à long terme, elle possède la qualité du césium d'émission).

Ce dispositif va donc permettre la synchronisation en phase d'oscillateurs locaux, sur la phase de la porteuse de France Inter.

A partir de la fréquence à 5 MHz, par exemple d'un oscillateur local, un signal à 5 MHz est synthétisé par un dispositif qui permet de disposer de ce signal avec 1 000 pas de phase possibles, soit une résolution de 0,2 ns. Un dispositif récepteur-phasemètre à 162 kHz identique à celui utilisé précédemment permet une comparaison avec la phase de France Inter. La résolution du phasemètre est de l'ordre de 1 ns.

Tout écart de phase supérieur à cette valeur provoque des corrections de la phase du 5 MHz local jusqu'à rééquilibrage du phasemètre.

La « phase locale de comparaison » à 162 kHz est donc maintenue en synchronisme avec la phase à 162 kHz reçue de France Inter, par action sur la phase du signal synthétisé à 5 MHz.

L'utilisation de ce même 5 MHz, corrigé en phase, comme pilote de fréquence d'autres signaux ou d'échelle de temps permet de disposer alors de signaux d'une assez bonne qualité.

Nous pouvons remarquer que la fréquence de l'oscillateur local peut ne pas être asservie, les limites de son exactitude, nécessaires à la bonne marche du dispositif, pouvant être assez larges. Ces limites dépendent de la « vitesse » maximum possible de correction de la phase du 5 MHz. Ainsi si celle-ci est de $\pm 1\,000$ pas de correction par seconde, l'exactitude de

la fréquence de l'oscillateur peut varier entre $\pm 2 \cdot 10^{-7}$.

Avec un tel pilote, nous avons réalisé une horloge dont la précision du top est voisine de 60 ns (± 30 ns). Son exactitude par rapport à France Inter étant parfaite. C'est-à-dire que sur plusieurs jours le top de seconde reste à 0 ± 30 ns d'un top qui serait obtenu directement par le « Césium » d'émission.

Rappel

La fréquence du césium d'émission éditée chaque mois dans le bulletin H du LPTF permet de retrouver l'écart d'exactitude de toute horloge directement liée à France Inter. Un écart de fréquence de $1 \cdot 10^{-12}$ par exemple donne une dérive de phase voisine de 100 ns par jour.

Notons que plusieurs de ces dispositifs en marche simultanément, suivent fidèlement la phase de France Inter, ce qui leur permet de rester ainsi en synchronisme mutuel tant que les « péripéties » de la réception de la phase de France Inter sont identiques pour tous ces dispositifs.

Nous faisons remarquer que ces dispositifs permettent de garder à long terme, l'exactitude (relativement à France Inter) qui leur a été donnée à l'initialisation, mais que cette initialisation ne peut pas être faite avec une précision du même ordre de grandeur, par France Inter lui-même. (Rappelons que le code horaire porté par France Inter ne permet actuellement qu'une précision voisine de la milliseconde).

D'autres moyens seront nécessaires à une initialisation de meilleure précision.

Ces asservissements ne sont efficaces qu'en présence de la réception de France Inter. Il y a lieu de prendre quelques dispositions si l'on veut garder la « bonne » qualité obtenue, même en cas de coupure de l'émission, et particulièrement, celle périodique de 4 heures chaque semaine.

Pour absorber cette absence et retrouver au retour d'émission le synchronisme « d'avant », il ne faut pas que, pendant l'arrêt, la « phase locale » servant à la comparaison à 162 kHz se soit écartée de plus de 1/2 tour de phase soit 3 μ s.

Pour cela deux solutions sont proposées :

- soit on arrête les corrections de phase du 5 MHz durant la coupure. Il faut alors que la fréquence de l'oscillateur local soit, à l'instant de l'interruption au plus à 10^{-10} de France Inter (besoin d'asservissement de fréquence) et que son coefficient de vieillissement soit inférieur ou égal à 10^{-9} /jour ;
- soit on mémorise la « vitesse » de correction de phase en présence de France Inter, et on continue ensuite, durant son absence, la correction avec la même « vitesse ».

5. Conclusion

Les différentes performances que l'on peut obtenir de la réception de la fréquence porteuse de France Inter se résument ainsi :

— Contrôle de fréquence d'oscillateurs locaux

avec une précision de 10^{-7} par seconde d'observation ;

- Asservissement en fréquence d'oscillateurs locaux avec une précision de fréquence asservie meilleure que 10^{-12} en 2 heures pour des « Rubidium », et que $5 \cdot 10^{-12}$ à $5 \cdot 10^{-11}$, suivant qualité, en 30 minutes, pour des « quartz » ;
- Synchronisation en phase d'oscillateurs locaux avec une précision de 60 ns.