Système d'asservissement pour étalon de fréquence

M. Olivier, R. Pretot

► To cite this version:

M. Olivier, R. Pretot. Système d'asservissement pour étalon de fréquence. Revue de Physique Appliquée, 1967, 2 (1), pp.17-19. 10.1051/rphysap:019670020101700 . jpa-00242757

HAL Id: jpa-00242757

<https://hal.science/jpa-00242757>

Submitted on 1 Jan 1967

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SYSTÈME D'ASSERVISSEMENT POUR ÉTALON DE FRÉQUENCE

Par M. OLIVIER et R. PRETOT,
Laboratoire de l'Horloge Atomique, Besançon.

Résumé. — On décrit un système d'asservissement pour étalon au césium fonctionnant par commutation de fréquence entre deux points de la courbe de résonance de la transition du césium, et l'on donne les résultats obtenus avec un tel système.

Abstract. — A control-system for a cesium standard is described. It uses frequency switching between two points of the cesium resonance curve, and the results obtained with such a system are presented.

Introduction. — Les transitions atomiques ou moléculaires utilisées jusqu'à ce jour pour la réalisation d'étalons de fréquence sont les transitions du spectre d'inversion de la molécule d'ammoniac et les transitions de structure magnétique hyperfine de l'hydrogène, du ^{133}Cs , du ^{87}Rb et du ^{205}Tl . Ces étalons appartiennent à deux classes différentes : les étalons passifs qui requièrent un signal, c'est-à-dire une onde électromagnétique pour induire une transition, et les étalons actifs qui produisent une onde grâce à une oscillation entretenue par émission induite.

L'étalon au Césium a bénéficié d'une technique ancienne et éprouvée : il a subi des améliorations technologiques très importantes et la fréquence de la transition du Césium est actuellement utilisée pour créer une échelle de temps atomique. L'étalon au Césium est un étalon passif, et la méthode classique d'asservissement du signal hyperfréquence sur le centre de la raie d'absorption utilise une modulation sinusoïdale de la fréquence ou de la phase du signal d'excitation.

Nous décrivons un système d'asservissement préconisé par Daams et Mungall [1] et appliqué sur un étalon type Varian BLR2 en fonctionnement au Laboratoire de l'Horloge Atomique de Besançon.

I. Étude du dispositif. — 1. MÉTHODE D'ASSERVISSEMENT. — On excite le tube à Césium, non pas avec le signal de fréquence f_0 que l'on veut asservir sur le centre de la raie d'absorption, mais avec deux signaux commutables de fréquences respectives f_1 et f_2 , f_1 et f_2 satisfaisant à la relation :

$$\begin{aligned} f_1 &= f_0 + \Delta b \\ f_2 &= f_0 - \Delta b \end{aligned}$$

Δb est une fréquence de l'ordre de la demi-largeur de raie.

Le signal de sortie du multiplicateur d'électrons du tube au césium est constant lorsque f_0 coïncide avec le centre de la raie, de fréquence f_r . On obtient par contre un signal de sortie modulé en créneau lorsque f_0 est différent de f_r : une détection de phase permet

d'obtenir un signal d'erreur d'amplitude proportionnelle au désaccord $\delta = f_0 - f_r$. Le signal d'erreur est appliqué sur un intégrateur dont la sortie commande le circuit d'accord de l'oscillateur à asservir.

FIG. 1

Schéma de principe du système d'asservissement.

2. SIGNAL D'ERREUR. — On peut approximer la raie de résonance d'un tube à jet atomique ayant une forme de Ramsey par la fonction :

$$I = I_r \left[\frac{1 + \cos 2\pi(f_0 - f_r) T}{2} \right] + I_0$$

I est le courant de sortie du tube, I_r l'amplitude de la raie centrale, I_0 le courant correspondant au premier minimum de la raie de résonance.

On obtient la largeur de raie $\Delta f = 1/2T$, T est le temps de vol des molécules entre les deux zones d'interaction.

En commutant le signal d'excitation entre les valeurs

f_1 et f_2 , nous obtenons un signal sous forme de créneaux d'amplitude

$$\begin{aligned} I &= f(\delta) \\ I &= I(f_1) - I(f_2) \\ &= \frac{I_r}{2} \left[\cos \frac{\pi(\delta - \Delta b)}{\Delta f} - \cos \frac{\pi(\delta + \Delta b)}{\Delta f} \right] \\ &= \frac{I_r}{2} \sin \frac{\pi \delta}{\Delta f} \sin \frac{\pi \Delta b}{\Delta f} \end{aligned}$$

ΔI est maximum lorsque $\Delta b = \Delta f/2$. Il est proportionnel au désaccord δ pour de faibles valeurs de celui-ci.

3. SYNTHÈSE DE LA FRÉQUENCE D'EXCITATION. — Le signal d'excitation du tube au Césium est obtenu à partir d'un oscillateur à quartz à 5 MHz. Une chaîne de multiplication classique fournit un signal à 225 MHz qui attaque un multiplicateur à cristaux. Le quarante et unième harmonique du signal d'entrée de ce multiplicateur est utilisé pour asservir en phase un klystron centré sur la raie de résonance du Césium. Ceci nécessite l'emploi d'un asservissement en phase utilisant une fréquence auxiliaire fournie par synthétiseur.

Ce synthétiseur comporte également le système de modulation : deux oscillateurs auxiliaires sont asservis en phase sur un oscillateur à quartz d'interpolation, mais avec une différence de fréquence égale à $\pm \Delta b$, et un commutateur électronique permet de commuter l'un ou l'autre de ces oscillateurs. Le signal d'asservissement est appliqué à l'oscillateur d'interpolation (fig. 2).

Le signal d'asservissement est obtenu d'une façon très simple : le courant de sortie du multiplicateur d'électron du tube au Cs est amplifié, puis attaque un système RC ayant une constante de temps de l'ordre de 10 s. La résistance est court-circuitée par le même

FIG. 2. — Synthétiseur et modulateur.

commutateur qui commute les oscillateurs f_1 et f_2 . On obtient ainsi une tension continue dont le signe dépend de la phase du signal de sortie du tube au Cs par rapport au signal de commutation, c'est-à-dire du décalage δ . Après amplification, ce signal actionne un moteur d'asservissement qui sert d'intégrateur et qui agit sur la capacité de l'oscillateur d'interpolation dont la fréquence f_0 est proche de 132 KHz.

Actuellement, nous mesurons la fréquence de l'oscillateur à quartz à 5 MHz par rapport à la raie d'absorption du Césium en mesurant la fréquence de l'oscillateur asservi f_0 . Le système ne constitue donc pas à proprement parler une horloge atomique. Il permet cependant des comparaisons de fréquence aisées en évitant la réalisation toujours délicate d'un synthétiseur de fréquence.

II. Étude sommaire de l'asservissement. — Nous représentons schématiquement ci-contre le système d'asservissement (fig. 3). Soient f_a la fréquence du

FIG. 3. — Schéma du système d'asservissement.

signal d'excitation en boucle fermée et f_0 sa fréquence en boucle ouverte. On a la relation :

$$f_a = f_0 - k_\alpha \alpha. \quad (1)$$

α repère l'angle de rotation du moteur entraînant une capacité placée dans le circuit d'accord du générateur f_0 . Pour de faibles variations de α , la variation de fréquence de ce générateur est proportionnelle à α et fait intervenir un facteur de proportionnalité k_α (Hz/rad).

La tension V_d à la sortie du détecteur synchrone est proportionnelle à l'écart :

$$V_d = K_d(f_a - f_r). \quad (2)$$

La tension V_d est appliquée sur un moteur fonctionnant en intégrateur : la vitesse de rotation est proportionnelle à V_d :

$$d\alpha/dt = K_m V_d. \quad (3)$$

En éliminant α et V_d entre (1) (2) et (3)

$$\frac{df_a}{dt} = \frac{df_0}{dt} - K_a K_m K_d (f_a - f_r).$$

Posons : $K = K_a K_m K_d (s^{-1})$.

On en déduit f_a :

$$f_a = f_r + (f_{e0} - f_r) e^{-Kt} + \frac{1}{K} \frac{df_e}{dt} [1 - e^{-Kt}].$$

La fréquence du signal d'oscillation f_a tend vers la fréquence de la raie f_r , dans la mesure où les fluctuations de f_e ont une moyenne nulle et où le gain K est suffisamment grand.

$$f_a = nf_q + (f_0)_a \rightarrow f_r$$

par suite $(f_0)_a \rightarrow f_r - nf_q$.

La précision de la mesure de la fréquence du quartz (f_q) par rapport au Césium (f_r) est limitée par les fluctuations de fréquence de l'oscillateur asservi ($f_0)_a$. Ces fluctuations ont des origines diverses. On peut distinguer :

a) Les fluctuations de fréquence de l'harmonique du quartz nf_q : nous pouvons y inclure le bruit de phase des chaînes de multiplication ainsi que le bruit apporté par l'asservissement en phase du klystron oscillateur local. Nous avons montré [2] que le bruit de l'oscillateur à quartz, après multiplication, est largement prépondérant.

b) Les fluctuations du générateur d'interpolation ($f_0)_e$: en utilisant un oscillateur à quartz, ces fluctuations sont négligeables vis-à-vis de celles du signal hyperfréquence nf_q .

c) Les fluctuations introduites par le bruit lié au signal de sortie du multiplicateur d'électrons.

Le bruit de l'oscillateur à quartz f_q est filtré par le système d'asservissement; les caractéristiques de ce filtrage sont données par la fonction de transfert globale du dispositif. On l'obtient en faisant le produit des fonctions de transfert de chaque élément. En notation de Laplace, on écrit respectivement les fonctions de transfert du tube et du préamplificateur $F_1(p)$, celle du système de détection $F_2(p)$ et celle de l'intégrateur $F_3(p)$:

$$F_1(p) = 1/(1 + pT_1) \quad F_2(p) = (1 + apT_2)/(1 + bpT_2) \\ F_3(p) = 1/p(1 + pT).$$

Le système se comporte donc finalement comme un filtre passe-bas vis-à-vis du bruit de l'oscillateur.

Le bruit attaché au courant de sortie du multiplicateur d'électrons passe à travers le système d'asservissement dont la fonction de transfert $Y(p)$ peut se mettre sous la forme :

$$Y(p) = - \frac{F(p)}{1 + F(p)}$$

$Y(p)$ tend vers zéro pour les valeurs élevées de ω . Les fluctuations rapides du bruit sont donc coupées par le système d'asservissement.

En conclusion, on a intérêt à augmenter la constante de temps du servomécanisme afin de diminuer les fluctuations du signal. On est limité dans cette voie par la stabilité de l'asservissement, qu'il est possible d'étudier grâce à la fonction de transfert. L'étude directe des fluctuations de l'oscillateur, et en particulier l'étude de la réponse à une perturbation en créneau, permet, de façon aisée, de se rendre compte des performances du système.

Nous donnons ci-dessous la réponse du système à un créneau ainsi que les fluctuations de fréquence pour une durée de mesure de 10 secondes.

FIG. 4. — Comparaison de fréquence Césium-quartz.

La variance des fluctuations de fréquence ne dépasse pas 2×10^{-11} .

FIG. 5

Stabilité de l'oscillateur asservi sur le Césium.

Conclusion. — Le système de modulation en créneau se caractérise par sa simplicité de mise en œuvre. Il permet d'éviter les erreurs systématiques qui peuvent être dues à une dissymétrie des bandes latérales de modulation dans les systèmes de modulation sinusoïdaux.

Manuscrit reçu le 13 décembre 1966.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DAAMS et MUNGALL, Proceeding of the 19th annual frequency Control Symposium.
- [2] OLIVIER (M.), thèse, octobre 1964.