

De FS30-GPS Een frequentiestandaard voor de gelijkstroombanden (1)

Le FS30-GPS Un standard de fréquence pour les bandes “courant continu” (1)

Door/par PAOWV – Traduit par ON5WF (MNS)

Inleiding

In **CQ-QSO** is in 2012, nummers 9-10 en 11-12, een secundaire frequentiestandaard beschreven zoals ik die heb gerealiseerd voor de standaardfrequentie die DCF77 uitzendt op 77,5 kHz.

Het is echter ook mogelijk, zelfs eenvoudiger, om van GPS, u weet wel de navigatiesatellieten, gebruik te maken om een standaard te maken. Dit artikel gaat over de realisatie van een dergelijke standaard. Ik weid op sommige plekken uit in details, want hoewel dit een nabouwartikel is, wil ik het voornamelijk stimuleren om zelf iets te ondernemen met onderdelen die in de eigen junkbox voorhanden liggen, dan wel in de handel vlot verkrijgbaar zijn. Dat kan, als je weet hoe een en ander werkt en ontworpen wordt, dus daar wordt aandacht aan besteed.

Baco Army Goods in IJmuiden verkocht TCXO's voor 10 MHz van Klove voor een paar euro. Dat gaf het duwtje in de rug om een paar standaarden te maken. Uiteraard zoveel mogelijk met spullen uit de junkbox en grijpvoorraad, waar heb je die immers anders voor? Het resultaat kan ook gebruikt worden om nog veel betere oscillatoren, zoals kwaliteitskristallen in een oventje, nauwkeurig op frequentie te brengen en te houden.

Voordeel van deze standaard ten opzichte van FS30-DCF is ook dat je OCXO's met willekeurige frequentie op hun juiste frequentie kunt houden en dat dat bovendien sneller gaat, zodat de eisen aan de eigen stabiliteit van de oscillator navenant lager zijn.

Ontwerp

Een TCXO is een temperatuurgecompenseerde kristaloscillator. De temperatuur mag dus verlopen. Door ingebouwde NTC's en een varicap wordt de resonantiefrequentie een stuk minder van de omgevingstemperatuur afhankelijk dan bij een losse kristaloscillator. Op een inputpen kun je een gelijkspanning aanbieden. Die bepaalt de resonantiefrequentie, die je met die spanning wat kunt vertrekken.

Mocht je geen TCXO uit de dump kunnen aanschaffen, dan kun je altijd via de website van Farnell of Digikey een TXCO of beter nog, een OCXO (oven controlled xtal oscillator) voor 10 MHz aanschaffen. Nieuw kosten die respectievelijk 70 en 170 euro zonder BTW, verzending en invoerrechten. Dan heb je een Zwitsers fabricaat van 0,2 ppm. Dus weet waar je op moet letten en sla je slag als de gelegenheid zich voordoet om iets uit de sloop aan te schaffen.

Het ontwerp hier beschreven is voor kwaliteitsoscillatoren geschikt. Enkele jumpers bepalen de gevraagde kwaliteit, zodat je indien gewenst ook met een wat minder goed kristal het beste eruit kunt halen dat haalbaar is.

In Elektuur, tegenwoordig omgedoopt tot Elektor, heeft in nummer 5 van jaar 2005 een toepassing van een GPS-navigatieontvanger gestaan. Daar heb ik destijds aan meegedaan door een kitje te kopen. Het was nog voor de TomTom voor de gewone man gemeengoed was, en dus een kans om kennis te maken met GPS-navigatie voor 85 euro. Leuk, je had een actieve waterdichte kleefmagneetantenne, een printje met de GPS-ontvanger en een USB- interface voor een notebook PC. Als je dan Microsoft Works startte op de notebook, zag je op de landkaart een cursor die aangaf waar je precies zat. Bedieningsgemak nihil, dus dat ding belandde alras, na het een keer als navigerende bijrijder in de auto gebruikt te hebben, in de junkbox. Elektor heeft die kitjes nog steeds uit voorraad te koop. Natuurlijk geen hond die daar nog aan begint. De ontvanger Trimble Lassen iQ 46240-20, SMD plugje, antennekabeltje, actieve antenne, batterijhouder, Li-Mn batterij CR2032 en stabilisator LM1117T, plus een 5 pins SIL-connector worden ervan gebruikt voor dit project. Het kitje is onder nr 13898 omschrijving “Onderdelenkit EPS 040264-71 GPS-receiver on USB” bij hen verkrijgbaar.

Introduction

Un standard de fréquence secondaire basé sur le standard de fréquence émis par DCF77 sur 77,5 kHz, a été décrit dans un article paru en 2012, dans les n° 9-10 et 11-12 de **CQ-QSO**.

Il est cependant aussi possible et même plus simple, de fabriquer un standard à partir d'un GPS. C'est l'objet de cet article. Certains points sont décrits en détail. En effet, bien que le but premier de cet article soit de pouvoir reproduire l'appareil, j'ai souhaité que chacun puisse construire un appareil semblable avec les composants dont il dispose ou peut se procurer facilement. Cela est possible si l'on a bien compris le fonctionnement de cet appareil.

Chez Baco Army Goods à IJmuiden, on vendait des TCXO à 10 MHz pour quelques euros. Cela m'a incité à réaliser une paire de standards. Évidemment, autant que possible, avec des pièces de mes fonds de tiroir; sinon, à quoi serviraient-elles? Le résultat peut aussi être utilisé pour amener et maintenir à la fréquence désirée, des oscillateurs encore meilleurs, tels que des quartz de qualité dans un four.

L'avantage de ce standard par rapport au FS30-DCF, est que vous pouvez maintenir sur leurs fréquences exactes des OCXO avec une fréquence aléatoire et ce, de manière plus rapide; il en résulte que les exigences de stabilité propre de l'oscillateur sont moins importantes.

Conception

Un TCXO est un oscillateur à quartz compensé en température. La température peut donc varier. Au moyen de CTN et d'une varicap incluses dans le boîtier, la fréquence de résonance est un peu moins dépendante de la température que dans le cas d'un oscillateur à quartz sans compensation. L'application d'une tension continue à l'une des broches d'entrée permet de faire varier un peu la fréquence de résonance.

Si vous ne disposez pas d'un TCXO pour 10 MHz, vous pouvez alors toujours en acheter un, ou encore mieux, un OCXO (oven controlled xtal oscillator) via le website de Farnell ou Digikey. Les nouveaux coûtent respectivement 70 et 170 euros hors TVA, frais d'envoi et d'importation. Vous avez alors un produit suisse à 0,2 ppm. Profitez donc de l'occasion si vous pouvez en récupérer un.

Le projet décrit ici est prévu pour des oscillateurs de qualité. Quelques cavaliers déterminent la qualité désirée, de manière à ce que vous puissiez, si nécessaire, obtenir un résultat valable avec un quartz de qualité moindre.

Dans Elektuur, rebaptisé aujourd'hui Elektor, est paru, dans le numéro 5 de 2005, un article décrivant une application d'un récepteur GPS. À l'époque, j'avais acheté le kit, ce qui m'a permis de faire connaissance, pour 85 euros, avec le système de navigation GPS. L'ensemble se composait d'une antenne magnétique active étanche, d'un circuit imprimé avec le récepteur GPS et d'une interface USB pour un notebook. En ouvrant Microsoft Works, on voyait sur une carte, un curseur indiquant l'endroit précis où on se trouvait. Facilité d'utilisation: zéro. Après l'avoir utilisé une fois comme navigateur dans la voiture, il a atterri dans ma boîte de matériel de récupération.

Ces kits sont encore disponibles chez Elektor. Cela n'intéresse évidemment plus personne. Le récepteur Trimble Lassen iQ 46240-20, le plug SMD, le câble d'antenne, l'antenne active, le support de batterie, la batterie Li-Mn CR2032 et le stabilisateur LM1117T, plus un connecteur SIL à 5 broches sont récupérés pour ce projet. Le kit est disponible sous le numéro 13898 avec comme description “Onderdelenkit EPS 040264-71 GPS-receiver on USB”.

GPS en de tijd

GPS heeft 24 of meer satellieten 'in de lucht' op ruwweg 21000 km hoogte, niet geostationair dus. Er zijn acht banen en elke baan bevat meerdere, doorgaans 4, satellieten. Door de gekozen hoogte draaien die precies twee keer per etmaal om de aarde. Door dit gehele veelvoud zie je elke dag een satelliet dezelfde baan langs het zwerk beschrijven. Er zijn er altijd een handjevol van in zicht. Elk van die satellieten heeft een atoomklok aan boord. De plaats op aarde wordt bepaald door de looptijd van de signalen die je bereiken, te bepalen. Om die looptijd te bepalen moet je precies de tijd weten dat de signalen in je ontvanger aankomen en die tijd wordt in de ontvanger bepaald door ook een vierde of vijfde satelliet in de berekeningen te gebruiken. De plaatsbepaling is dan strijdig door redundante strijdige gegevens, maar als je de tijd in de ontvanger in de berekeningen als variabele opneemt, dan kun je die uit de vergelijkingen oplossen, zodat de gegevens niet meer strijdig met elkaar zijn, voor de juiste gevonden tijd. Aldus weet je de precieze tijd in elke GPS-ontvanger met een kwaliteit die die van de atoomklokken benadert. Er is, omdat er regelmatig andere satellieten zichtbaar zijn, wel een wisseling van satellieten voor de berekening, en wat daarvan het effect is, zal van de firmware in de ontvanger afhangen.

Bij een aantal fabrikanten en types ontvangers (NIET alle dus) wordt een secondepuls van die nauwkeurige berekende klok naar buiten uitgevoerd. Dat blijkt bij de Trimble 46240-20 die Elektor in de kit levert en die 12 satellieten gelijktijdig kan ontvangen, het geval te zijn, maar er is geen printspoorje voor op hun print aangebracht.

Gegevens van de secondepuls zijn: TTL-niveau, ongeveer 4 μ s breed. De opwaartse flank bepaalt met een jitter van 50 ns de atoomtijdseconde. Die 50 ns is natuurlijk onbruikbaar, want op 1 seconde is dat aan de voor- en achterkant van het tijdsinterval samen 100 ns en dat is 1 op 10^7 ofwel 1 Hz op 10 MHz. Daar hoeft je nauwelijks een standaard voor te maken. Af en toe zerobeaten tegen WWV of een ander ijkstation en je hebt dat resultaat ook.

Echter, die jitter blijft 50 ns, dus als je over 100 seconden je eigen oscillator meet, dan is de onzekerheid in de tijd nog steeds 100 ns, en zit je dus al 1 op 10^9 . En over 1000 seconde, minder dan 20 minuten dus, op 1 op 10^{10} . Dat is dus wel goed bruikbaar. De meettijd is korter dan bij de ontvangst van DCF77 en de eisen aan de eigen stabiliteit van de oscillator zijn dus ook minder zwaar.

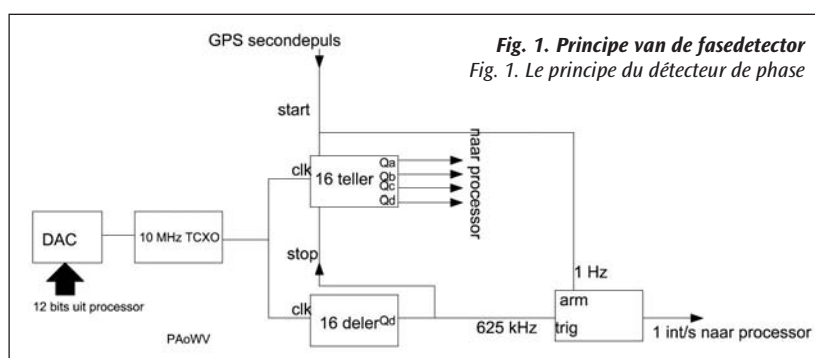
Voor het goede begrip: het moet duidelijk zijn dat je je eigen oscillator niet vast moet koppelen aan een ijkzender of aan een GPS-signaal, omdat die dan vrolijk meejittert, maar je moet je eigen oscillator op de lange duur in de pas houden met dat jitterende signaal. Zoets als een aangelijnde hond die dan weer voor en dan weer achter de eigenaar loopt maar nooit verderaf kan zijn dan de lijnlengthe toelaat, inmiddels alle gepasseerde bomen en andere verticale stationaire artefacten 'verbeterend' met een reukspoor, een eigenschap die zendamateurs zullen herkennen.

Ontwerp

Je kan het ontwerp onnodig gecompliceerd maken, maar eenvoudig is en blijft kenmerk van het ware. Daarvoor heb ik het volgende bedacht en in **figuur 1** toegelicht.

De TCXO van 10 MHz wordt door een deler door 16 gedeeld. Die deler blijft altijd doorlopen en levert dus een pulstrein met een frequentie van 625 kHz af. Tevens is de 10 MHz TCXO een klok voor een 16 teller.

Die loopt echter niet altijd, maar die loopt maar even, een keer per seconde, en wel gestart door de opflank van de GPS-secondepuls en gestopt door de eerstvolgende puls van 625 kHz uit de 16-deler. Als hij gestopt is, geeft hij een interrupt request af aan de controller. Dat gebeurt dus een keer per seconde en daar wordt de controller niet moe van.



Le GPS et le temps

Le GPS utilise au moins 24 satellites à environ 21000 km d'altitude, donc non géostationnaires. Il y a huit orbites et sur chacune d'elles plusieurs satellites (habituellement 4). A cette altitude, ils tournent autour de la terre exactement deux fois par 24 heures. Du fait de ce multiple entier, on voit chaque jour un satellite décrire la même orbite dans le firmament. Il y en a toujours plusieurs en vue. Chacun de ces satellites transporte une horloge atomique. La position du récepteur sur la terre est déterminée par le calcul du temps de parcours des signaux reçus. Pour déterminer ce temps de parcours, il faut connaître avec précision les instants d'arrivée de ces signaux au récepteur et ces instants sont déterminés dans le récepteur en utilisant pour les calculs un 4ème ou un 5ème satellite. La détermination de la position donne un résultat incohérent à cause des données redondantes conflictuelles. Cependant, en considérant le temps dans le récepteur comme variable, on peut résoudre les équations et obtenir alors un résultat cohérent. Le temps déterminé par un récepteur GPS est connu avec une précision approchant celle des horloges atomiques. Du fait du changement régulier des satellites en vue, il y a une variation des satellites pour le calcul; l'effet de cela sur le résultat dépendra du firmware dans le récepteur.

Dans certains types de récepteur, une impulsion de période égale à une seconde, produite à partir de ces horloges précises, est disponible à l'extérieur. Cela semble être le cas sur le Trimble 46240-20 livré en kit par Elektor et qui peut recevoir 12 satellites en même temps, mais il n'y a pas de prise sur le print.

Caractéristiques de cette impulsion: niveau TTL, environ 4 μ s de largeur. Le flanc montant de l'impulsion détermine la seconde de temps atomique avec une gigue de 50 ns. Avec le flanc descendant, cela fait une incertitude de 100 ns sur une seconde, soit 1 sur 10^7 ou 1 Hz sur 10 MHz. Pas la peine de faire un standard pour cela. Un zerobeat avec WWV ou une autre station de référence donne le même résultat.

Cependant, cette gigue reste égale à 50 ns, donc, si on mesure son propre oscillateur sur 100 secondes, l'incertitude sur le temps est encore de 100 ns, et on a alors une précision de 1 sur 10^9 . Et sur 1000 secondes, donc moins de 20 minutes, on arrive à 1 sur 10^{10} . Cela est donc bien utilisable. Le temps de mesure est plus court qu'avec DCF77 et les exigences de stabilité pour l'oscillateur sont donc aussi moins importantes.

Il faut bien comprendre que l'on ne doit pas coupler son propre oscillateur à un émetteur de référence ou à un signal GPS, cet oscillateur subirait en effet la même gigue que celle du signal de référence. Il faut par contre bien garder, sur le long terme, l'oscillateur dans les pas du signal de référence. Un peu comme un chien tenu en laisse et qui peut courir en étant tantôt derrière son maître, tantôt devant, mais ne peut jamais aller plus loin que ce que la laisse lui permet.

Conception

Il est possible de compliquer inutilement le projet, mais comme on dit, la vérité est dans la simplicité. C'est pourquoi j'ai pensé ce qui suit et est illustré à la **figure 1**.

Le TCXO de 10 MHz subit une division par 16. Ce diviseur fonctionne de façon continue et délivre un train d'impulsions de fréquence égale à 625 kHz. Ce TCXO est aussi une horloge pour un compteur par 16. Ce compteur fonctionne une fois par seconde et est démarré par le flanc montant de l'impulsion "seconde" du GPS et est arrêté par la première impulsion suivante de 625 Hz du diviseur par 16. Son arrêt provoque

l'envoi d'une demande d'interruption au contrôleur. Cela se produit une fois par seconde et ne surcharge pas le contrôleur. Le contrôleur saisit alors, sur 4 fils, l'état du compteur par 16 qui est stoppé, et passe ensuite à l'action. Cela veut dire moyenner et en déduire ce que le DAC à 12 bits connecté au contrôleur doit recevoir pour amener

De controller pakt dan, als reactie daarop, op 4 draadjes de stand van de 16-teller die gestopt is, aan, en gaat daarmee aan de gang. Dat wil zeggen, uitmiddelen en daaruit bepalen wat de op de controller aangesloten 12-bits DAC op zijn dak moet krijgen om de TCXO op de juiste frequentie te brengen en te houden. Om ongerief door storing van de secondepuls te voorkomen, wordt bij een interrupt tengevolge van een secondepuls, de interrupt in de afhandeling routine disabled en pas weer enabled als het hoofdprogramma de aangeboden tellerstand heeft aangepakt en gaat verwerken.

Is de 10 MHz precies 10 MHz en de GPS-secondepuls jittervrij, dan zal de stand van de 16-teller altijd hetzelfde zijn als hij steeds op 0 zou starten. Is de 10 MHz TCXO 1/100 Hz te hoog (1 op 109 dus), dan zal na 100 seconde de doorlopende 16-deler inmiddels een klokpuls teveel gekregen hebben. De output (stoppuls) is dan 1 klokpuls eerder, zodat de teller na de eerstvolgende startpuls een lager zal stoppen. Dat betekent dat de TCXO in 100 seconde 1 volledige sinus is doorgeschoven en dat wordt dus gedetecteerd.

Ambigüiteit treedt op als je na 1 seconde 16 klokpulsen van 10 MHz ernaast zit. Dan staat je TCXO er 16 Hz naast. Zoiets grofstoffelijks gebeurt niet in een standaard, dus dit is een bruikbaar concept. Verloopt de TCXO qua fase op den duur een veelvoud van dat bedrag, maar niet meer dan $16 \cdot 2\pi$ radialen per seconde, dan is dat na te lopen doordat de kennis van de driftrichting aanwezig is en het geaccumuleerde faseverloop wordt bijgehouden.

Uit metingen blijkt dat van tienduizenden waarnemingen, afgerond de volgende seconde de fase in 71% hetzelfde is en in bijna 14% een minder en bijna 14% een meer is. De rest zijn andere waarden die optreden kort na inschakelen en ook als er een vliegtuig overvliegt, heb ik een keer toevallig gemerkt.

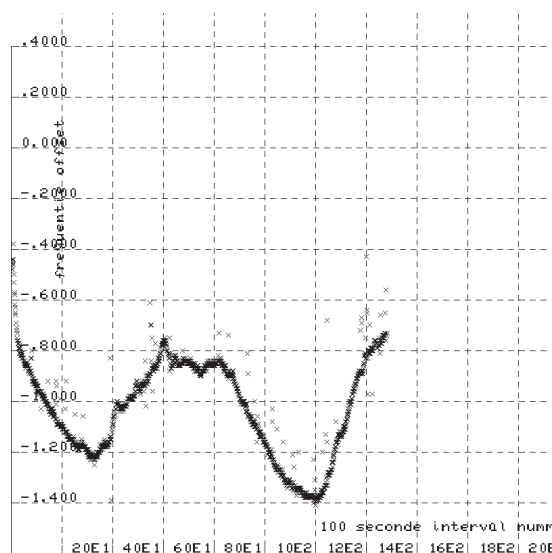
Een resetpuls op de 16-teller, zodat die steeds op 0 begint, is niet nodig, want de controller weet de startstand, omdat dat de stopstand van de vorige meting is, en kan dus uit de nieuwe stopstand het verschil berekenen hoeveel de teller is doorgelopen. Vandaar dat er geen resetlijn te zien is in de tekening van **figuur 1**.

Je zou met nog minder dan het geringe aantal IC's dat dit concept realiseert, kunnen volstaan als je de 16-teller een GPS-seconde lang laat tellen en vervolgens een seconde stilzet voor uitlezing. Nadeel is dat je het aantal metingen halveert, en tevens dat een uitlezing de dubbele jitter heeft omdat de start- en de stoppuls beide van de standaardjitter voorzien zijn.

De controller zorgt voor het afhandelen van de interrupts door elke secondetik van de GPS-ontvanger de tellerstand op te nemen. Hij stuurt de DAC aan zodat de frequentie indien nodig bijgestuurd kan worden, en hij verzorgt RS232-output zodat je metingen naar een PC kunt sturen ter bestudering van de stabiliteit en het uitvoeren van andere experimenten. Bij het inschakelen wordt de tijdconstante van het PLL-filter korter gehouden zodat de TCXO snel naar de gewenste eindwaarde toegaat, om vervolgens de tijdconstante van de middeling op te voeren tot de met de jumpers ingestelde waarde.

Hier geldt ook dat hoe groter de tijdconstante, hoe nauwkeuriger je kunt meten maar hoe minder vaak je kunt bijregelen, met het gevolg dat eisen aan de TCXO 's eigen stabiliteit groter worden. Uit de metingen kan dan blijken wat de behaalde stabiliteit is.

Er is een jumper op de schakeling die, indien geplaatst, de TCXO loskoppelt van de regeling en de DAC halverwege zijn instelbereik plaatst. Dit is om de TCXO eenmalig af te regelen en daarmee kun je ook zien wat de TCXO aan variabele drift vertoont als die niet geregeld wordt. Die bepaalt mede de maximaal toelaatbare lengte van de meetperiode en dus de maximaal haalbare nauwkeurigheid van de standaard. De kwaliteit van de oscillator bepaalt dus de kwaliteit van de standaard. **Figuur 2** toont een meting over 2 dagen van de GPS-gegevens en de lokale niet gekoppelde TCXO.



Les mesures permettront de déterminer la stabilité.

Un cavalier sur le circuit permet de découpler le TCXO de la régulation; en même temps, le DAC est positionné au milieu de son domaine de variation. Cela permet d'effectuer un réglage du TCXO et par la même occasion, de voir quelle est sa dérive lorsqu'il n'est pas régulé. Celle-ci détermine la durée de mesure maximum permise et donc la précision maximum que l'on peut obtenir du standard. La qualité de l'oscillateur détermine donc la qualité du standard. La **figure 2** montre une mesure sur deux jours des données GPS et du TCXO non régulé.

Fig. 2. Drift TCXO in 2 dagen, Y-as 0,2 Hz per schaaldeel

Fig. 2. Dérive du TCXO sur 2 jours, échelle des ordonnées: 0,2 Hz par division

et maintenir le TCXO sur la bonne fréquence. Pour ne pas être dérangé par les impulsions "seconde", lors d'une interruption produite par une impulsion "seconde", l'interruption dans la routine de traitement est désactivée et seulement réactivée, lorsque le programme principal a saisi l'état du compteur et va le traiter.

Si le 10 MHz est exactement 10 MHz et les impulsions "seconde" du GPS exemptes de gigue, l'état du compteur par 16 sera toujours le même puisqu'il démarrera toujours à zéro. Si le 10 MHz du TCXO est 1/100 Hz trop haut (1 sur 10^9 donc), le diviseur par 16 (fonctionnant constamment) aura reçu, après 100 secondes, une impulsion d'horloge de trop. La sortie (impulsion STOP) est alors en avance d'une impulsion d'horloge; il en résulte que le compteur, après la première impulsion START suivante, s'arrêtera une période d'horloge plus tôt. Ce qui signifie qu'en 100 secondes, le TCXO est décalé d'une sinusoïde complète, et cela est donc détecté.

L'ambigüité intervient lorsqu'après 1 seconde, on est décalé de 16 impulsions d'horloge à 10 MHz. Le TCXO est alors décalé de 16 Hz. Une telle erreur ne se produit pas dans un standard, c'est donc un concept utilisable. Si le TCXO est déphasé d'un multiple de ce montant sur le long terme, mais pas plus que $16 \cdot 2\pi$ radians/sec, alors c'est rattrapable car la direction de la dérive et le déphasage cumulé sont connus.

Il résulte de mesures et de dizaines de milliers d'observations que, en gros dans 71 % des cas, la phase est la même la seconde suivante, plus faible dans presque 14 % des cas et plus grande dans presque 14 % des cas. Le reste correspond à d'autres valeurs qui interviennent peu après le démarrage et aussi lors du survol par un avion.

Une impulsion de reset sur le compteur par 16, de façon à ce que celui-ci commence toujours à 0, n'est pas nécessaire, car le contrôleur connaît l'état de départ qui est aussi l'état d'arrêt de la mesure précédente, et il peut donc calculer à partir du nouvel état d'arrêt, de combien le compteur a progressé. C'est pourquoi il n'y a pas de ligne de reset à voir dans le dessin de la **figure 1**.

On pourrait arriver au même résultat avec moins de CI en laissant le compteur par 16 compter pendant une seconde GPS, et ensuite en l'arrêtant pendant une seconde pour la lecture. L'inconvénient de cette méthode est que l'on diminue par deux le nombre de mesures et aussi qu'une lecture a une gigue deux fois plus grande parce que les impulsions de départ et d'arrêt sont toutes les deux affectées de la gigue du standard.

Le contrôleur gère les interruptions en saisissant à chaque seconde GPS, l'état du compteur. Il pilote le DAC de façon à ajuster la fréquence si nécessaire. Une sortie RS232 permet d'envoyer les résultats des mesures vers un PC pour une étude de la stabilité ou la réalisation d'autres expériences. Lors de la mise en marche, la constante de temps du filtre PLL est maintenue plus courte de façon à ce que le TCXO arrive rapidement à la valeur finale désirée, pour ensuite être amenée, selon la constante de temps moyennée, à la valeur fixée par les cavaliers.

Plus la constante de temps sera grande, meilleure sera la précision de la mesure mais la régulation sera d'autant moins bonne, avec la conséquence que les exigences de stabilité du TCXO seront plus importantes.