

# Un étalon de fréquence secondaire au Rb piloté par GPS (1) Een GPS bijgeregelde Rb secundaire frequentiestandaard (1)

Door/par PA0WV – Vertaling/Traduit par ON5WF

## Introduction

Récemment, j'ai construit trois étalons de fréquence basés sur un TCXO de Klove – acheté il y a quelque temps pour un prix dérisoire à la brocante de Baco à IJmuiden – lesquels sont verrouillés sur un GPS au moyen d'une boucle à verrouillage de phase digitale à grande constante de temps, réalisée au moyen d'un microcontrôleur, de façon à ce que la gigue de phase du signal "seconde" reçu par le GPS, soit moyenné sur un plus long temps réglable. Ces étalons de fréquence ont été décrits dans les CQ-QSO n° 2-3 et 4-5 de 2013 et ces descriptions se trouvent également sur mon site <http://pa0wv.home.xs4all.nl/zelfbouw.html> sous le lien fs30-gps.

Il se fait que j'ai eu la chance de reprendre, pour quelques centaines d'euros, un oscillateur au rubidium de type LPRO-101, chez PA0RYL qui s'était pour cela inscrit à l'exposition des appareils "fabrication maison" lors du DVDRA 2012 (Dag Van De Radio Amateur 2012). Il s'agit d'un étalon secondaire comme on peut en trouver régulièrement sur eBay, provenant probablement de réseaux téléphoniques cellulaires américains, où ils sont préventivement remplacés avant qu'ils commencent à poser des problèmes.

Voyons donc ce que nous pouvons faire avec cela.

Afin de rendre cet article lisible sans obliger le lecteur à se référer constamment à mes anciennes publications sur ce sujet, j'ai décidé de reprendre ici les parties essentielles de ces anciennes publications là où cela est nécessaire.

## Inleiding

Recent heb ik drie frequentiestandaarden gebouwd die gebaseerd zijn op een TCXO van Klove - een tijdje geleden voor een paar knaken gekocht bij Baco dump in IJmuiden - die gelocked worden aan GPS met een middels een microcontroller gemaakte digitale phase locked loop met lange RC tijd, zodat jitter van het ontvangen GPS seconde-signaal wordt uitgemiddeld over een langere instelbare tijd. Ze staan gepubliceerd in 2013 nummer 2-3 en nummer 4-5 van CQ-QSO, het verenigingsblad van de UBA en zijn ook te vinden op mijn website op URL <http://pa0wv.home.xs4all.nl/zelfbouw.html> onder de link fs30-gps.

Nu zag ik kans om voor een paar honderd euro een rubidiumoscillator type LPRO-101 over te nemen van PA0RYL, die daarvoor een inschrijving op de DVDRA 2012 zelfbouwtentoonstelling had gehouden. Een secundaire standaard zoals die ook regelmatig op eBay uit de dump te koop zijn, vermoedelijk afkomstig uit Amerikaanse celtelefoonnetwerken, waar ze vroegtijdig vervangen worden voordat ze problemen beginnen te geven.

Eens kijken wat we daarmee kunnen doen.



Om er geen zoekplaatje van te maken, heb ik besloten om dit verhaal apart leesbaar te houden, zonder voortdurend te verwijzen naar paragrafen en tekeningen van mijn eerdere publicaties. Er is dan wel gekozen om de verhalen die reeds gepubliceerd zijn, in te korten tot de essentie, die voor een zelfstandig ontwerp met andere parameters en onderdelen voldoende gegevens biedt.

**Photo 1. Oscillateur au rubidium type LPRO-101**

Foto 1. Rubidium oscillator type LPRO-101

## L'étalon

L'étalon Efratom type LPRO-101 fonctionne avec un tube rempli de vapeur de rubidium Rb87 porté à l'état d'ionisation. Nous autres radio-amateurs savons bien que ce phénomène d'ionisation se produit aussi avec un tube TL placé près d'une antenne ou du boîtier ouvert d'un coupleur d'antenne (je veux bien entendu parler ici des radioamateurs expérimentés, amateurs selon la définition de l'ITU donc, la grande partie restante étant constituée d'amateurs pousse bouton "anoblis", ignorant la CW, qui collectionnent des cartes QSL et participent à des contests avec des transceivers japonais). Dans le cas qui nous occupe, cette ionisation est produite en irradiant avec un signal à 60 MHz, le tube de vapeur de Rb qui est porté à 106°C; celle-ci émet alors une lumière de couleur magenta comportant deux composantes spectrales importantes. L'une des deux est éliminée au moyen d'un filtre Rb85, la composante restante a pour effet d'empêcher le gaz Rb87 d'absorber encore de la lumière provenant du filtre Rb85. Ce résultat est obtenu en appliquant un champ magnétique qui porte les électrons à différents niveaux d'énergie présentant des différences hyperfines. Il s'agit en fait ici de l'effet Zeeman, du nom du physicien néerlandais qui l'a mis en évidence et a reçu pour cela un prix Nobel.

La mécanique quantique nous apprend que seules des quantités d'énergie discrètes peuvent être absorbées. En d'autres mots, il faut payer avec le compte d'énergie juste, sinon, le paiement n'est pas accepté. Cette énergie peut être fournie à une fréquence bien déterminée, laquelle dépend faiblement du champ magnétique appliqué. Le champ magnétique sépare les composantes spectrales. C'est aussi en observant la séparation des composantes spectrales du soleil et des étoiles que nous pouvons mesurer les champs magnétiques.

Le rayon lumineux incident filtré tombe, après passage à travers le gaz Rb87, sur une cellule photoélectrique sur laquelle on mesure environ 0,1 % d'énergie en moins lorsqu'une fréquence de 6,834682610904 GHz précisément est injectée.

La bande de fréquences dans laquelle cet effet se produit est très étroite (pas infiniment étroite à cause du bruit) et peut être détectée avec une photodiode, laquelle détermine l'intensité du faisceau lumineux incident.

Le champ magnétique est appelé champ C. Avec le LPRO-101, en réglant la tension de commande entre 0 et 5 volts, il est possible de faire varier l'intensité de ce champ C, ce qui a pour conséquence de modifier légèrement à la hausse ou à la baisse, la fréquence du dip; cette modification est de l'ordre de 1,5E-9, c'est à dire 1,5 Hz par GHz. Lorsque l'intensité du champ reste constante et lorsque l'équilibre thermique est atteint, la fréquence est stable à 1E-11, c'est-à-dire 1 Hz sur 100 GHz. Nous allons voir jusqu'où nous pouvons arriver.

Nous utiliserons ce champ C pour synchroniser l'étalon de fréquence sur les horloges atomiques des satellites GPS qui ensemble, nous fournissent gratuitement le nec plus ultra, bien que fragile, en matière de référence.

À côté de la cellule photoélectrique avec l'électronique associée dans le LPRO-101, il faut évidemment aussi un système permettant de générer la fréquence désirée de 6,8 GHz à partir d'un oscillateur à quartz à 20 MHz avec tension réglable, un VCXO donc, avec un synthétiseur. Synthétiseur est un grand mot car le résultat désiré est obtenu en multipliant par 3 les 20 MHz du VCXO, ce qui donne 60 MHz pour l'irradiation de la lampe. Ensuite, au moyen d'une diode "step recovery", on obtient la fréquence de 6840 MHz qui est le 114<sup>ème</sup> harmonique du 60 MHz. Le 20 MHz du VCXO est aussi divisé par 2 pour la sortie 10 MHz, ensuite encore par 2 (ce qui donne 5 MHz) et enfin par 16, ce qui donne 0,3125 MHz. Ce dernier résultat est mélangé avec le 5 MHz dans une porte exor, ce qui donne 5,3125 MHz comme fréquence somme.

## De standaard

De standaard Efratom type LPRO-101 werkt met een gasbuisje waarin rubidiumdamp van de isotoop Rb87 zit. Dat wordt in een oplichtende (geïoniseerde) toestand gebracht, zoals wij zendamateurs – althans de experimenterende amateurs, amateurs per definitie van de ITU dus, de overgrote rest bestaat uit 'veredelde' CW-loze stekkeramateurs die QSL-kaarten verzamelen en radiowedstrijdjes doen door middel van jappenbakken – wel weten dat ook gebeurt met een TL buis die je dicht bij je antenne of de open kast van je antenntuner houdt. In dit geval gebeurt dit door er een 60 MHz signaal in te stralen en tevens wordt de gasbuis verhit tot 106 °C. Dan gaat dat gas licht geven dat er magenta-kleurig uitziet. Er zijn twee belangrijke spectrumcomponenten. Een wordt er weggefilterd met een Rb85 filter, de overgebleven component zorgt ervoor dat het Rb87 gas geen licht meer absorbeert dat uit het Rb85 filter komt. Dat komt door een aangebracht magnetisch veld dat de elektronen in diverse spinsoorten met bijbehorend energieniveau verdeelt, die hyperfijne verschillen in energieniveau vertonen. Het zogenaamde Zeeman-effect, dat is genoemd naar de Nederlander die het ontdekte en er met een Nobelprijs voor werd gehonoreerd.

De kwantummechanica leert dat alleen gekwantificeerde hoeveelheden energie kunnen worden geabsorbeerd, je moet dus met gepast energiegeld betalen anders wordt het niet geaccepteerd. Die energie kan worden toegevoegd met een nauwkeurig bepaalde frequentie, die zwak afhangt van het aangebrachte magneetveld. Het magneetveld splitst de spectrumcomponenten. Dat is ook de wijze waarop we op de zon en de sterren magnetische velden kunnen meten door naar de splitsing van spectrumcomponenten van het licht ervan te kijken.

De rechtdoorgaande invallende gefilterde lichtstraal valt na het passeren van het Rb87 gas op een fotocel. Daarop wordt ongeveer 0,1 % minder energie gemeten als precies een frequentie wordt ingestraald van 6,834682610904 GHz.

Dat instralen waarbij dat effect optreedt, blijkt zeer smalbandig te zijn, door ruis niet oneindig smal, en het is dus te detecteren met een fotodiode, die de sterkte van de doorvallende lichtstraal vaststelt.

Het magneetveld wordt het C-veld genoemd. Dat C-veld kun je wat in sterkte bijregelen bij de LPRO-101 met het gevolg dat de dipfrequentie ietsje, namelijk 1,5E-9 dus 1,5 Hz per GHz omhoog of omlaag wijzigt als je de stuurspanning tussen 0 en 5 volt varieert. Wordt het veld niet meer gewijzigd, dan is de frequentie na voldoende opwarmtijd stabiel op 1E-11 dus 1 Hz op 100 GHz. We zullen kijken hoever we kunnen komen.

Dat C-veld gaan we gebruiken om de standaard te synchroniseren met de GPS satelliet atoomklokken, die tezamen het voor ons gratis beschikbare, weliswaar bibberige, neusje van de zalm vormen.

Er is naast de fotocel met bijbehorende elektronica in de LPRO-101 uiteraard ook elektronica nodig, die de vereiste frequentie van 6,8 GHz opwekt uit een met spanning regelbare kristaloscillator van 20 MHz, een VCXO dus, met een synthesizer. Synthesizer is een groot woord, want het gewenste product ontstaat door 20 MHz van de VCXO te vermenigvuldigen met 3, dat geeft 60 MHz voor de lampinstraling. Vervolgens die 60 MHz met een step recovery diode te voorzien van groot aantal harmonischen, de 114de harmonische is 6840 MHz. Tevens wordt 20 MHz van de VCXO gedeeld door 2 voor de 10 MHz output, en vervolgens door 2 (dat geeft 5 MHz) en daarna door 16, dat geeft 0,3125 MHz. Met een exor poort wordt dat gemengd met de genoemde 5 MHz, wat als somfrequentie een component 5,3125 MHz geeft. De output

La sortie de la diode "step recovery" est mélangée avec ce 5,3125 MHz et le résultat de ce mélange contient, parmi de nombreuses composantes, la fréquence désirée. Une cavité (facteur de qualité Q élevé donc) maintenue à température constante et montée autour de la lampe, sélectionne le produit de mélange désiré en éliminant les autres. Les produits de mélange non désirés qui ne sont pas éliminés n'ont pas d'influence, le processus ne réagissant en effet avec un dip d'intensité lumineuse qu'à la composante spectrale de 6,8 GHz.

Etant donné que lorsque le VCXO dérive, on ne sait pas dans quel sens il part, on fait varier très légèrement, au moyen d'une tension réglable, la fréquence autour de 6,8 GHz, de façon à maintenir le quartz sur la bonne fréquence. Le Q du dip est de l'ordre de 10 millions. Sur un flanc, l'enveloppe du signal à la sortie du photo détecteur a sa phase inversée, et sur l'autre flanc, elle ne l'est pas. Cela permet de voir si l'on est trop haut ou trop bas en fréquence. Si la fréquence est juste, l'enveloppe ressemble à un signal redressé biphasique et son premier harmonique a disparu.

Ensuite, après enclenchement de la tension d'alimentation, on fait varier légèrement (170 Hz) à la hausse ou à la baisse, la fréquence de l'oscillateur à quartz, de façon à le verrouiller lorsque le signal de 6,8 GHz qui résonne dans la cavité autour de la lampe, passe le dip et que par conséquent, l'intensité lumineuse diminue à cause de l'absorption dans le gaz. Ensuite, le signal qui atteint la photodiode est maintenu au centre du dip par la boucle. D'après la valeur du Q du dip d'absorption du Rb 87, la largeur du dip à 3 dB est d'environ 680 Hz. A 10 MHz, cela fait 1 Hz. Pour une stabilité de  $1E-11$ , cela signifie qu'à 6,8 GHz, il faut maintenir le système au centre du dip d'absorption à 0,068 Hz près. La fréquence du dip lumineux peut être légèrement modifiée en faisant varier un peu l'intensité du champ magnétique. Dans le cas du LPRO-101, le domaine de réglage prévu est d'environ  $1,5 E-9$ . Il est possible de commander le système par une source encore plus stable, comme une horloge atomique au césium. On peut aussi utiliser pour le verrouillage, une moyenne de longue durée des satellites GPS, méthode que je vais décrire ici. Dans ce cas, nous pouvons alors obtenir un étalon de fréquence stable jusqu'à  $1E-11$ , et maintenu sur la fréquence exacte de 10 MHz. L'électronique décrite jusqu'ici est incluse dans le boîtier du LPRO.

Après la mise sous tension, la lampe doit d'abord chauffer jusqu'au moins 100 °C, et la cavité jusqu'à 70 °C. On peut alors observer un glissement de l'ordre de -17 à +18 ppm (donc au total, environ 350 Hz à 10 MHz) avec un laps de temps d'environ 20 s pour trouver le dip. Le verrouillage se produit alors après environ 2 minutes, dans un intervalle de 0,5 Hz autour de 10 MHz (5E-8). Commence alors la recherche du milieu du dip lumineux et la stabilité maximum (de l'ordre de  $1E-11$ ) est atteinte après environ une demi heure.

La tension de réglage appliquée à l'oscillateur à quartz, laquelle varie à la hausse et à la baisse pendant le glissement, est aussi disponible à la broche 9 du LPRO-101, sous la forme d'un signal variant entre 0 et 15 volts, jusqu'à ce que le système se verrouille. Cela permet de vérifier le vieillissement du quartz, celui-ci étant compensé par une modification de la tension de réglage pendant l'état verrouillé. Cette tension est visible sur la face avant du boîtier au moyen d'un microampèremètre de 50  $\mu$ A de déviation totale, obtenue (au moyen d'une résistance ad hoc) pour une tension de 15 volts. Dans le cas de mon exemplaire, le verrouillage se produisait pour une tension de 6 volts, après quelques oscillations lentes autour de cette valeur à partir du démarrage à froid. Dans le cas d'une échelle avec 50 divisions pour le glissement de 350 Hz, un vieillissement de 7 Hz correspond à une division et un vieillissement plus faible est bien observable.

Pour se faire une idée de ce que représente cette stabilité de  $1E-11$ , une horloge basée sur ce système présenterait après 10000 ans, une erreur de moins de 3 secondes. Et un oscillateur à 10 MHz est juste à  $1/10000^{ème}$  de Hz près, donc après 10000 secondes (à peine 3 heures), il aura varié d'une période seulement. Si on en a deux, on a le temps de les comparer en phase.

van de steprecovery diode, die dus als primaire mengproducten som en verschil geeft met een modulerende frequentie, wordt daarmee gemengd, waardoor als een van de vele componenten de gewenste frequentie ontstaat. Een op een vaste temperatuur gehouden cavity resonator, hoge Q dus, om de lamp gemonteerd, selecteert het gewenste mengproduct en de ongewenste in de buurt daarvan uit. Niet uitgefilterde ongewenste producten hebben geen invloed, omdat het proces alleen met een dip in de lichtsterkte reageert, vanwege het gepast geld betalen aan energie, op de genoemde 6,8 GHz spectrumcomponent.

Omdat je, als de VCXO drift, niet weet of je te hoog of te laag zit, wordt de frequentie een ietsepietsie op en neer gehaald op 6,8 GHz, en middels een daaruit afgeleide regelspanning wordt het kristal op zijn plek gehouden zodat die frequentie blijft kloppen. De Q van de dip is ruwweg 10 miljoen. Op een flank keert de omhullende van het signaal uit de fotodetector in fase om, en op de andere flank juist niet. Daaraan kun je zien of je te hoog of te laag in frequentie zit. Zit je precies goed, dan lijkt de omhullende op een dubbelfasig gelijkgericht signaal en is de eerste harmonische ervan verdwenen.

Dan wordt in een regellus na inschakelen van de voedingsspanning, de kristaloscillator een beetje (170 Hz) in frequentie langzaam op en neer getrokken en gelocked als het eruit gemaakte 6,8 GHz signaal dat in de om de lamp gemonteerde cavity resoneert, de dip passeert, en het doorgelaten licht door absorptie in het gas dus vermindert. Vervolgens wordt het signaal dat de fotodiode bereikt door de regellus in het centrum van de dip gehouden. Bij de genoemde Q van Rb 87 zijn absorptiedip, is de dip op de 3 dB punten dus ongeveer 680 Hz. Op 10 MHz is dat 1 Hz. Omdat stabiliteit van  $1E-11$  wordt genoemd, betekent dat dus dat men dan op 0,068 Hz de boel stabiel in het midden van de absorptiedip houdt op 6,8 GHz. Je kunt de frequentie van de lichtdip gering wijzigen door het genoemde magnetisch veld wat in sterkte te wijzigen. Regelbereik waarin de LPRO-101 voorziet is ongeveer  $1,5 E-9$ , waardoor de zaak gelocked kan worden aan een nog stabielere bron, zoals een cesium atoomklok, of gekoppeld met een langdurig gemiddelde van de GPS satellieten, wat ik hier ga beschrijven. Resultaat is dan dat we een standaard kunnen verkrijgen die tot op  $1E-11$  stabiel is en tevens op de juiste frequentie van 10 MHz wordt gehouden. Tot zover hier beschreven elektronica zit allemaal in de LPRO-does.

Na inschakelen moet eerst de lamp opwarmen tot ruim 100 graden celsius, en de cavity tot 70, tevens begint het sweepen met ongeveer -17 en +18 ppm (dus totaal over 350 Hz op 10 MHz) Hz met een periodetijd van ongeveer 20 s om de dip te vinden, dan lockt de zaak na ongeveer 2 minuten, en zit dan binnen 0,5 Hz van 10 MHz (5E-8), gaat dan het midden van de lichtdip zoeken en de hoogste stabiliteit wordt na ongeveer een half uur bereikt. Die ligt in de orde van  $1E-11$ .

De aan de kristaloscillator aangeboden regelspanning, die dus tijdens het sweepen op en neer gaat, is ook naar buiten uitgevoerd op pen 9 van de LPRO-101 als een signaal dat tussen 0 en 15 volt op en neer sweept, tot hij lockt. Daaraan kun je dus de oudering van het kristal relateren, omdat die met een wijziging van de regelspanning wordt gecompenseerd tijdens gelockte toestand. Daarom is die spanning op het frontpaneel op een analoog 50  $\mu$ A metertje zichtbaar gemaakt, dat een voorschakelweerstand heeft die de volle schaaluitslag 15 volt maakt.

Bij mijn exemplaar lockt hij op 6 volt op de meter, na vanaf koude start enkele keren langzaam op en neer gesweept te zijn. Bij een metertje met 50 schaaldelen voor de sweep over 350 Hz is dus een oudering van 7 Hz al een vol schaaldeel en minder dan dat al snel goed waarneembaar.

Als je, om een idee van de stabiliteit  $1E-11$  te vormen, er een klok mee maakt, zou die minder dan 3 seconde in de 10000 jaar verlopen. En een 10 MHz oscillator staat er dan gemiddeld  $1/10000$ -ste Hz naast, dus na 10000 seconde dat is krap drie uur, is die gemiddeld pas een complete sinusperiode verlopen. Als je er twee hebt, zou je ze dus onderling in fase kunnen vergelijken, omdat 3 uur wel een tijd is die te overzien is.

L'intérêt de cette grande stabilité pour les radioamateurs réside dans la possibilité de détecter des signaux faibles noyés dans le bruit, comme par exemple dans le cas du morse QRSS. Cela permet aussi de produire un signal stable dans le domaine des micro-ondes de telle façon qu'à la réception, on sache précisément où trouver le signal et qu'on ne doive pas courir derrière ce signal à cause d'une très grande dérive. On attend donc le premier QSO EME en QRP QRSS avec seulement 5 watts et ce dans une bande de fréquences étroite.

La lampe au rubidium a une durée de vie limitée, entre autres à cause de la condensation de la vapeur de rubidium sur l'intérieur de la paroi de la lampe où la température est plus basse. Il en résulte une diminution de l'énergie tombant sur la photodiode. Cette énergie est mesurable à la broche 5 du connecteur sous la forme d'une tension continue dénommée "lamp voltage". Avec une lampe neuve, on obtient 9 volts, contre 3 pour une lampe usée. La durée de vie prévue était de 10 ans. Mon exemplaire semble donner sur cette broche, une tension de 9,6 volts. C'est donc un peu bizarre, mais il y a des unités qui sont révisées en Asie par des charlatans. On ajuste probablement le coefficient d'amplification du circuit de mesure de la lampe en modifiant quelques composants. Il en résulte une tension plus élevée à la broche 5 et par conséquent, la lampe paraît moins vieille qu'elle ne l'est en réalité, ce qui donne plus de valeur à l'unité sur le marché des occasions.

La fréquence du dip qui peut être un peu modifiée avec le champ magnétique C, est réglable au moyen d'une tension de 0 à 5 volts appliquée à la broche 7, ainsi qu'avec un potentiomètre 10 tours monté sur le circuit imprimé du LPRO-101. Un petit trou situé sur le dessus du couvercle en mu métal du boîtier permet d'atteindre ce potentiomètre.

La gigue des impulsions des secondes du GPS est, selon Trimble le fabricant du type de récepteur GPS que je possède, de 50 ns sur le flanc avant. Pour une précision de 1E12, il faut effectuer une moyenne sur au moins un jour (100000 s).

Mettre le LPRO-101 en fonctionnement permanent n'est pas une bonne chose. Il consomme grosso modo 200 kWh par an et la lampe à vapeur de Rb a une durée de vie limitée de 10 ans dont une bonne partie est généralement déjà passée.

Après la mise sous tension, il faut attendre quelques minutes, le temps que l'enceinte de la lampe et la cavité aient atteint la température désirée. Le verrouillage du système est signalé par le passage à l'état bas de la broche 6; ce signal est utilisé pour allumer une led verte sur la face avant du boîtier. Cela peut d'ailleurs aussi se voir au voltmètre qui mesure la tension du VCXO.

Etant donné que le système a déjà presque atteint sa stabilité finale une demi-heure après la mise sous tension, cette longue période de mise en œuvre n'est plus nécessaire. Toutefois, après la construction, un laps de temps bien plus long qu'un jour est nécessaire pour atteindre la valeur exacte de la tension de commande du champ C. Lors de la mise hors tension, cette valeur est automatiquement mémorisée dans l'EEPROM du contrôleur utilisé, de façon à repartir avec cette valeur lors de la mise sous tension suivante. Cette écriture dans l'EEPROM prend pas mal de temps, et le remplacement automatique de la valeur précédente n'est pas toujours souhaitable.

Pour cette raison, une autre solution a été choisie pour démarrer avec les réglages (presque) corrects. Un bouton poussoir placé à l'arrière de l'appareil, permet si nécessaire, avant la mise hors tension, de mémoriser dans l'EEPROM les réglages de l'état stationnaire, valeurs sur lesquelles se fera le redémarrage suivant.

Une sinusoïde à 10 MHz (-7 dBm sur 50 ohms) est disponible à la broche 1 du connecteur du LPRO. Cette broche est accessible sur la face avant via un connecteur BNC et supporte une charge de 50 ohms. Selon la datasheet du LPRO, ce signal peut être fourni sous la forme TTL, ce qui est nécessaire pour le circuit imprimé du GPS. Ce signal TTL à 10 MHz est aussi disponible sur la face avant et supporte une charge de 50 ohms.

De praktische zin van die hoge stabiliteit voor zendamateurs ligt in het gebruik voor weak signal detection diep in de ruis, bijvoorbeeld met QRSS Morse, en om een stabiel signaal in het microgolfgebied te kunnen maken zodat de ontvanger weet waar hij smalbandig moet kijken en een signaal niet achterna hoeft te rennen door de geweldige drift. Het wachten is dus op het eerste QRSS QRP CW moonbounce QSO met 5 watt output in een breinaald.

De rubidiumlamp heeft een beperkte levensduur, omdat onder andere het rubidium op de duur als spotjes metaal op de binnenzijde van de buitenwand van de lamp condenseert. Daar is de temperatuur lager, vandaar. De energie die op de fotodiode valt, neemt dan af. Die wordt uitwendig op pen 5 van de connector als output beschikbaar gesteld, in de vorm van een gelijkspanning als "lamp voltage". Bij 3 volt op die pen is het wel afgelopen met de lamp, 9 volt is vrijwel nieuw. De geplande servicevrije levensduur was 10 jaar.

Mijn exemplaar blijkt 9,6 volt op die pen te hebben. Dat is dus een beetje vreemd, maar er zijn units die in Azië door beunhazen gereviseerd worden, en mogelijk stelt men de versterkingsfactor van het lampmeetcircuit bij, door wat componenten te wijzigen, teneinde een hogere spanning te verkrijgen op pen 5, waardoor de unit op de tweedehandsmarkt meer waard is, omdat die minder oud lijkt dan hij is.

De dipfrequentie die minimaal regelbaar is met een magnetisch C-veld, is instelbaar met een regelspanning tussen 0 en 5 V op pen 7 en tevens met een 10 turn potmeter op de print van de LPRO-101, naar keuze. Om de printpot te kunnen bedienen zit er een gaatje in het mu-metalen deksel van de behuizing aan de bovenzijde.

De jitter van de secondepulsen van GPS is volgens Trimble, de fabrikant van het type GPS ontvanger dat ik beschikbaar heb, 50 ns op de voorflank. Willen we op een nauwkeurigheid van 1E12 uitmiddelen dan moet de uitmiddelingstijd dus ruim een dag zijn (100000 s).

Het is niet verstandig de LPRO-101 altijd in te zetten, hij verbruikt pakweg 200 kWh per jaar, en de gaslamp heeft een beperkte levensduur van 10 jaar, waarvan doorgaans al een flink deel verbruikt is.

Als je hem inschakelt, moet je een paar minuten wachten, tot het lamphuis en de cavity de gewenste temperatuur bereikt hebben. Als de zaak gelocked is, wordt dat aangegeven met een pen BITE, pen 6 op de connector, die dan laag gaat. Dat zie je trouwens ook aan de meter die aan de VCXO spanning hangt, die blijft dan hangen. Die BITE gebruik ik om een groen LED in het frontpaneel aan te sturen.

Omdat de zaak een half uur na inschakelen al bijna zijn eindstabiliteit heeft bereikt, is dat lang instaan ook niet nodig. Hoewel de eerste keer na de bouw wel langer dan een etmaal de gelegenheid gegeven moet worden om de juiste C-veld stuurspanning te bereiken. Die wordt (dat was het plan) bij uitschakelen altijd automatisch onthouden in het EEPROM van de gebruikte controller, en er de volgende keer gelijk mee opgestart. Dat schrijven in EEPROM kost tamelijk veel tijd, en niet altijd zal het automatisch overschrijven van eerder geschreven data gewenst zijn.

Daarom is een andere oplossing gekozen, om te starten met de (nagenoeg) correcte instelling, te weten een drukknop op de achterzijde van het apparaat, die voor het uitschakelen naar wens bediend kan worden om de verkregen steady state instellingen in EEPROM te zetten, waar dan de eerstvolgende keer direct mee wordt gestart bij inschakelen.

Er wordt een 10 MHz sinus afgegeven -7 dBm op 50 ohm aan pen 1 van de LPRO-connector. Die wordt op het frontpaneel via een BNC connector uitgevoerd en is belastbaar met 50 ohm.

Tevens wordt er op een door de LPRO-datasheet voorgestelde voorkeurswijze een TTL signaal van gemaakt, nodig voor de GPS print.

Ook dat digitale 10 MHz signaal op TTL niveau wordt met 50 ohm belastbaar op het frontpaneel beschikbaar gesteld.

## L'alimentation

L'alimentation requise est de 19 à 32 volts continus, un régulateur série dans le LPRO fournissant la valeur désirée. Pour une dissipation minimum, il faut alimenter le régulateur avec la tension continue minimum, donc 19 volts. Mais pour tenir compte des variations possibles du secteur (de l'ordre de 10%), il est sage de prendre au minimum 21 volts. La tension nominale préconisée par le fabricant est de 24 volts, c'est cette valeur que j'ai utilisée et qui a l'avantage de permettre l'emploi d'un stabilisateur de type 7824.

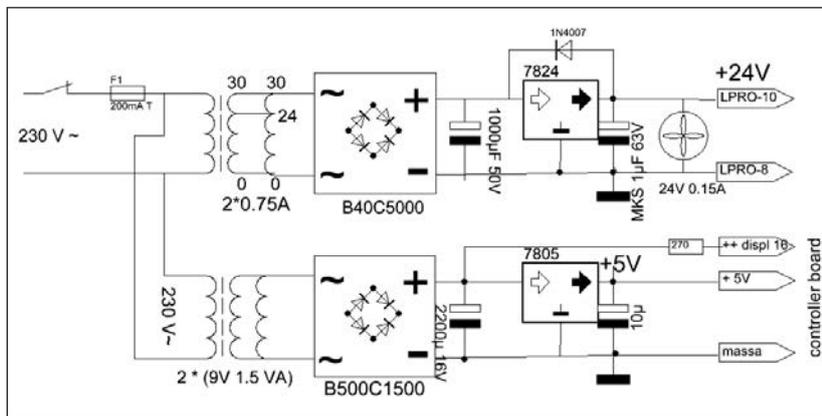


Fig. 1. L'alimentation / Fig. 1. De voeding

## De voeding

De vereiste voeding is 19 tot 32 volt gelijkspanning, die in de LPRO unit met een serieregelaar naar de gewenste waarde wordt gebracht. Als je zorgt dat hij de minimumspanning krijgt in het dal van de brom achter de gelijkrichter, dus 19 volt, heb je dan minimale dissipatie. Je moet echter wel rekening houden met netspanningsvariaties, zodat 20 volt als de netspanning 230 volt is wel het minimum zal moeten worden. 21 volt is beter, dan mag

het net 10% variëren, hetgeen voorkomt. De nominale spanning die de fabrikant opgeeft voor de voeding is 24 volt. Die heb ik toegepast, mede omdat je dan een stabilisator kunt gebruiken van het type 7824.

## Raccordement du LPRO-101

Le LPRO-101 peut être raccordé au circuit imprimé au moyen d'un connecteur à 10 broches avec un câble plat très court. Il est donc important que le connecteur du LPRO et celui du circuit imprimé soient montés l'un en face de l'autre. Le LPRO n'a pas de "boxed header", on peut donc y monter le connecteur décalé. Pour éviter cela, lorsqu'il faut effectuer une déconnexion, je n'enlève le câble que du côté du circuit imprimé où il y a un "boxed header".

## Avant projet d'ensemble

On réalise d'abord l'interface avec le "statusmeter" de 50 µA.

Lorsque cela est en ordre, les étapes suivantes sont l'activation du récepteur GPS, la réalisation de la PLL digitale et la mise au point de la régulation par celle-ci de la tension de commande du champ C à la broche 7 du LPRO-101.

A cet effet, on va utiliser le développement du précédent projet dont il a été question plus haut, à savoir le GPS TCXO, avec cependant d'autres paramètres car les moyennes se font maintenant sur 50000 secondes ou plus. Plusieurs modifications sont nécessaires, comme l'emploi d'une EEPROM pour mémoriser la tension de réglage du champ C avant une mise hors tension, de façon à ce qu'au redémarrage, ce champ C soit initialisé à la valeur obtenue précédemment après une longue mise en route. Un circuit permettant de détecter à temps cette mise hors tension avait été prévu, mais a, après réflexion, été remplacé par un bouton poussoir monté sur la face arrière et protégé contre un actionnement intempestif par un bouchon de tube de dentifrice.

Pendant mon service militaire, j'étais affecté à la base aérienne de Woensdrecht en tant que monteur radio qualifié. C'était, selon les supérieurs, qui en ce temps pouvaient vous condamner à la peine de mort et vous faire subir contre votre propre volonté, des injections illégales, aussi important pour vous dans la société civile. Pour cette raison, vous deviez servir six mois moins un jour en plus. Pourquoi ce jour en moins? Parce que dans ce cas, vous auriez été 2 années complètes en service et que dans ce cas, ils auraient été obligés de vous fournir un nouveau costume civil.

Là, sur cette base, ils avaient monté sur les avions de chasse T33, un système permettant de larguer, au moyen de boulons explosifs commandés par un bouton poussoir, les réservoirs de carburant placés sous les ailes. Cela permettait d'éviter la destruction des ailes en cas d'atterrissage d'urgence avec les réservoirs pleins. Un caporal de carrière, sur le point d'être promu sergent, m'avait raconté que sur les

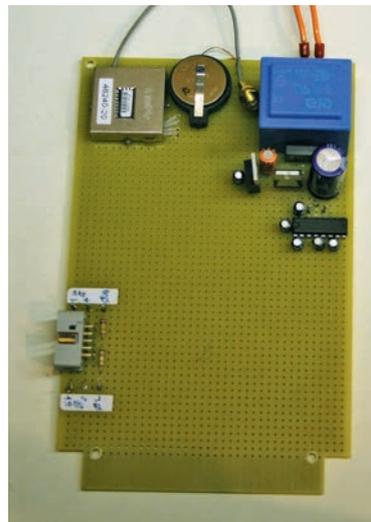


Photo 2 / Foto 2

## Aansluiting LPRO-101

De LPRO-101 kan worden aangesloten met een 10 pins bandkabel connector, met een heel kort bandkabeltje naar de printplaat. Het is dus van belang dat de connector van de printplaat en die van de LPRO recht tegenover elkaar gemonteerd zitten. De LPRO heeft geen boxed header, je kunt dus de connector er verschoven opzetten. Om dat te voorkomen, zet ik hem er een keer op, en als de zaak gedemonteerd moet worden haal ik de kabel alleen los aan de printzijde, waar wel een boxed header zit gemonteerd.

## Globaal ontwerpplan

De interfacing naar de 50 µA statusmeter wordt het eerst in orde gemaakt.

Als een en ander werkt, dan is de volgende stap de GPS ontvanger te activeren, de digitale PLL te maken en die de C-veld spanning op pen 7 van de LPRO-101 te laten regelen.

Daarvoor plan ik gebruik van de ontwikkeling van het eerder genoemde GPS TCXO ontwerp, echter met andere parameters, omdat nu uitgemiddeld wordt over 50000 seconde of langer. Er zijn meer wijzigingen nodig, zoals het gebruik van EEPROM bij uitschakelen van de standaard, zodat bij inschakelen het C-veld op het eerder bereikte langdurig gemiddelde wordt geïnitieerd. Voorts een detectie-circuit om die uitschakeling (brown out) tijdig vast te stellen, waar bij nader inzien vanaf is gezien; er zit nu een tegen abusievelijke aanraking beschermde drukknop in de achterwand (dopje van een tandpasta tube).

Tijdens mijn militaire dienstplicht was ik gestationeerd op vliegbasis Woensdrecht als in dienst opgeleide radiomonteur; dat was volgens de bevelvoerenden, die je in die tijd de doodstraf konden toedienen en ongrondwettelijk injecties dwongen te ondergaan tegen je eigen wil in, ook voor jezelf van belang in de burgermaatschappij, en daarom moest je een half jaar minus 1 dag langer dienen. Waarom die ene dag? Omdat je anders vol 2 jaar in dienst was geweest en in dat geval moesten ze je van een exemplaar nieuwe C&A confectieburgerslobberkledij voorzien. Daar op die vliegbasis Woensdrecht hadden ze van die drukknoppen in een kommetje gemonteerd in de cockpit van T33 straaljagers, daarmee kon je met springladingbouten de tip tanks van de vleugels afschieten. Als met volle tiptanks een noodlanding gemaakt moest worden, voorkwam dat het doorzwiepen en knakken van de vleugels. Een beroepskorporaal-I op het punt tot sergeant bevorderd te worden vertelde mij, dat je daar rustig op kon drukken bij in de hangar gestalde toestellen, omdat er een extra veiligheid was. "Kijk maar, zei hij. Dreun!! De golfmetalen zijwanden van de hangar hadden sindsdien

avions stationnés dans les hangars, on pouvait sans crainte actionner ce bouton car il y avait une sécurité supplémentaire. "Regarde, dit-il". Et il poussa sur le bouton!! Les parois en tôles ondulées du hangar avaient depuis lors le modèle d'une femme enceinte. J'ai été sourd pendant 6 jours et l'homme n'est plus jamais devenu sergent. On pouvait d'ailleurs se promouvoir soi-même au rang supérieur. Un simple soldat avait des barrettes bleues. En les cirant, elles prenaient une teinte bronzée comme celles d'un caporal. Un caporal pouvait faire la même chose en teintant ses barrettes pour qu'elles soient argentées comme celles d'un sergent. Tous ces militaires de carrière pouvaient donc monter d'un rang en teintant leurs barrettes.

Après cet intermezzo, revenons à notre étalon au Rb. Ensuite, il faut effectuer la commande de la led BITE qui indique que le verrouillage du LPRO est atteint. Une batterie de secours n'est pas nécessaire car l'appareil peut être éteint normalement. De plus, une amélioration a été apportée pour passer de la logique 3,3 volts à 5 volts, ainsi que l'ajout de drivers pour les sorties digitales TTL, de façon à ce que celles-ci puissent être chargées en 50 ohms (pas plus d'une sortie à la fois) et la conversion du signal de sortie analogique -7 dBm 10 MHz du LPRO vers le niveau TTL. Afin de garantir la précision du temps de mise en route du filtre presque 50 fois plus long, le calcul en virgule flottante du filtre devra pouvoir se faire avec plus de bits et il faudra donc chercher de combien de bits nous avons besoin pour ce calcul. De même, l'initialisation et la procédure de réglage demandent une attention particulière, car le signal à 10 MHz délivré par le LPRO juste après la mise sous tension, n'est pas encore stable et ne peut pas servir de référence pour la PLL. Il faudra donc attendre au moins un bon quart d'heure avant de pouvoir comparer les impulsions des secondes du GPS avec la sortie du LPRO.

La tension de commande du champ C peut éventuellement se déterminer à partir de l'état du DAC, lequel est lisible sur l'afficheur LCD. Si cette valeur n'est pas connue lors du premier démarrage, elle le sera après une semaine de fonctionnement continu de l'appareil; il suffit alors d'appuyer sur le bouton poussoir de l'EEPROM pour la mémoriser. Lors du redémarrage suivant, l'initialisation se fera avec cette valeur mémorisée.

### Calcul de la résistance du microampèremètre

Le LPRO délivre une tension VCXO comprise entre 0 et 15 volts. Pour cette mesure, on a donc choisi 15 volts comme valeur de fin d'échelle. Pour la tension de la lampe, la valeur de fin d'échelle a été fixée à 10 volts. Un inverseur est donc nécessaire pour faire passer le microampèremètre d'une mesure à l'autre. Pour un 50  $\mu$ A, les résistances séries sont donc de 200k et 300k. Cependant, le LPRO présente, selon le schéma d'interface dans la datasheet, une  $R_i$  de 20 kohms sur les broches du connecteur. Cette valeur de  $R_i$ , ainsi que la résistance du microampèremètre, doivent donc être soustraites des valeurs calculées plus haut. (à suivre)

het model van een zwangere vrouw, ik was zes dagen doof, en de man is nooit meer bevorderd tot sergeant. Dat laatste kon je overigens zelf ook doen, want een soldaat-1 had blauwe strepen, ging je die poetsen dan werden ze bronskleurig, en dat was de eerstvolgende hogere rang van korporaal. Een korporaal echter kreeg bronskleurige strepen en ging je die poetsen dan werden ze zilverkleurig, weer een rang hoger namelijk sergeant. Doortrapt. Al die beroepslui konden zichzelf precies een rang hoger poetsen.

Terug naar de Rb-standaard na dit intermezzo. Verder wordt het bedienen van de BITE led gewenst, die aangeeft dat de lockpositie van de LPRO is bereikt. Battery backup is onnodig, omdat het apparaat gewoon uitgezet kan worden. Tevens wordt een verbetering met levelshifters aangebracht voor signaaltransport tussen 3,3 en 5 volt logica, alsmede drivers voor de digitale TTL outputs, zodat die met 50 ohm belast kunnen worden (niet meer dan een output gelijktijdig) en conversie van de analoge -7 dBm 10 MHz output van de LPRO naar TTL level. Om de nauwkeurigheid van de bijna 50 keer langere uitmiddelstijd van het filter te kunnen waarborgen, zal ook de floating point berekening van het filter mogelijk met meer bits dienen te geschieden en uitgezocht zal moeten worden hoeveel bits we dienen te gebruiken bij de floating point berekeningen. Ook de initialisatie- en afregelprocedure verdient aandacht, omdat de 10 MHz die de LPRO levert kort na inschakelen nog niet stabiel is en dus niet gebruikt mag worden als referentie voor de phase locked loop, dienen we dan minstens een stief kwartiertje te wachten voor we secondetikken van GPS gaan vergelijken met de LPRO-output.

De C-veld spanning is eventueel te bepalen uit de DAC stand die op de LCD display afleesbaar is. Weet je die instelling bij de eerste keer inschakelen niet, dan is die bekend na het een week continu in werking zijn van het apparaat. Dan op de EEPROM knop drukken, de waarde wordt

opgeslagen en de eerstvolgende keer dat je het apparaat weer gaat gebruiken start hij op die waarde.

### Berekening meterweerstand

De LPRO levert een VCXO-spanning tussen 0 en 15 volt. In die meting is daarom een bereik van 15 volt gekozen voor volle schaaluitslag. Voor de lampspanning is een volle schaaluitslag van 10 volt aangehouden. De meter moet dus omgeschakeld kunnen worden met een tumbler. De totale serie-weerstand voor die bereiken is dus 200k en 300k voor een 50  $\mu$ A meter. Echter, de LPRO heeft volgens de

interfaceschema's in de datasheet een  $R_i$  van 20 kohm op de connectorpennen, die moet er dus afgetrokken worden, en tot slot moet de meterweerstand afgetrokken van de berekende serieweerstand. (wordt vervolgd)

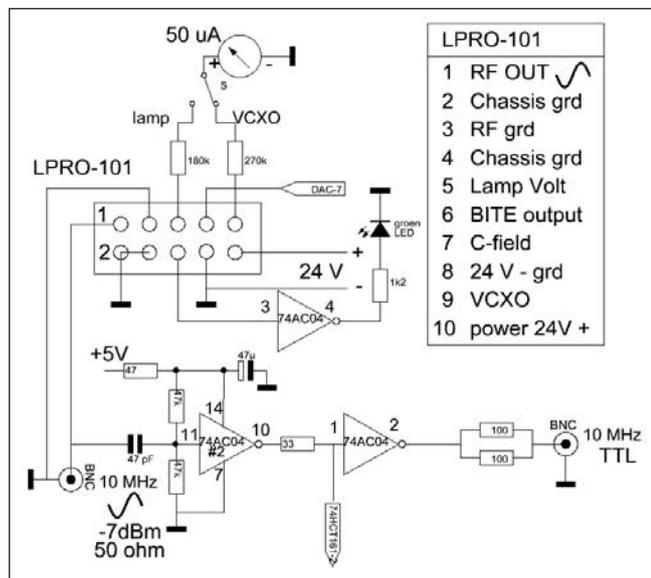


Fig. 2. L'interface du LPRO / Fig. 2. LPRO interface