

GPS Disciplined Oscillator — Measured Data (#2)

GPS 同期オシレータ — 測定データ編 (#2)

武安義幸 / JA6XKQ

周波数安定度の測定データから、GPS 同期オシレータが OCXO の長期的な経時変動に対して有効に動作していることが確認できました。しかし、製作直後から判明していた OCXO の温度特性と GPS 同期の PLL としてのループ・フィルタ特性のミスマッチの問題を解決しないことには、GPS 同期オシレータを実用に供することができません。ここでは、PLL 位相誤差と OCXO 制御電圧の温度特性のデータを取得することで、問題解決の糸口をつかみたいと思います。

温度特性のデータ

環境温度の変化に対して GPS 同期オシレータの PLL のロックが外れた例を示します。図-1 に PLL 位相誤差と OCXO 制御電圧を、図-2 に温度変化を示します。グラフの横軸は時間経過を示しており、同スケールの 図-1 と 図-2 で事象を関連づけることができます。

図-1 において PLL 位相誤差は青のプロットで、左側の縦軸を、OCXO 制御電圧はピンクのプロットで、右側の縦軸を読取ります。いずれも制御用の PIC がシリアル・ポートから出力する値をそのままプロットしたもので単位をつけていませんが、前者の目盛りは 1.39 nsec/カウント となります。後者は 18 ビット

DAC の上位 16 ビットのみを出力したもので、DAC 出力には抵抗による分圧を入れており、電圧値への直接的な換算が難しいので単位を付与していません。いずれも傾向に着目することが目的です。

図-2 において4本のプロットは、低いほうから室温、ケース内部

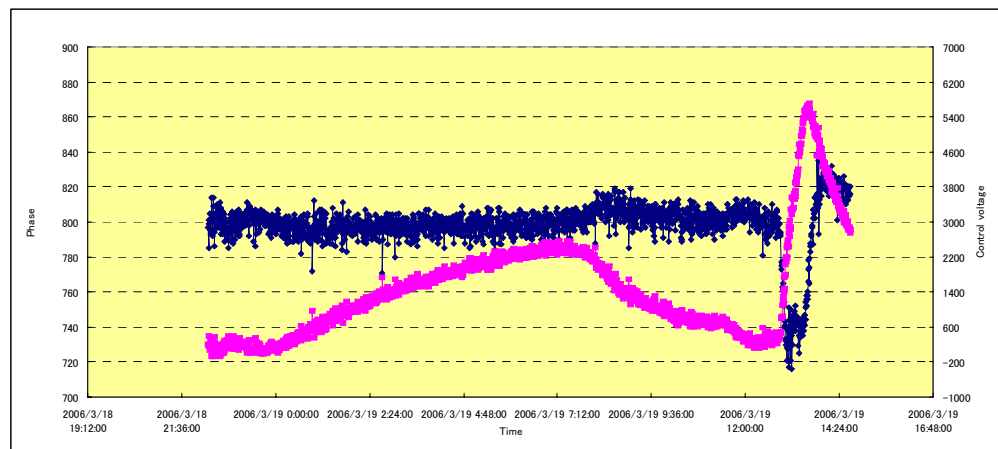


図-1 : PLL 位相誤差(青)と OCXO 制御電圧(ピンク)

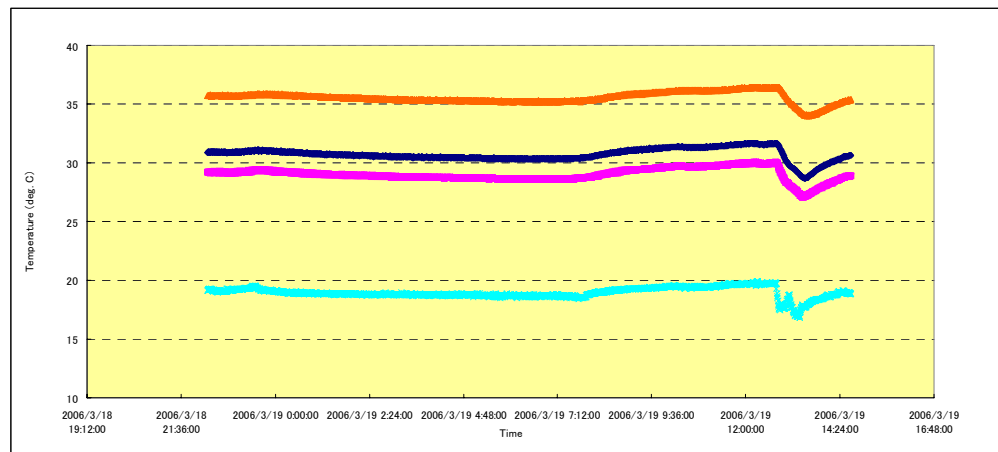


図-2 : 温度変化

温度、内部インターバル・カウンタの基準発振器の温度、そして OCXO 内部温度を示しています。

図-2 の室温がなだらかに変化しているのは昼夜での温度差であり、後半の急激な温度変化は部屋の窓を開け閉めしたためのものであります。

温度特性の考察

図-1 と 図-2 を比較すると、なだらかな室温変化に対しては OCXO 制御電圧が追従して PLL 位相誤差が一定(約 800 カウント)となっていることが読取れます。

一方、急激な室温変化に対しては OCXO 制御電圧が一応追従はしているものの、追従の遅れから PLL 位相誤差が大きく変化(オーバーシュート)していることが判ります。オーバーシュートの後、PLL 位相誤差が目標値(約 800 カウント)へ向って収束しつつある様子が読取れます。この事象が製作直後からの問題点です。

GPS 同期オシレータの制御アルゴリズム(PLL のループ・フィルタ)は、GPS 自身や伝播上の位相ゆらぎと、過去に意図的に付加されていた SA による位相ゆらぎをフィルタリングするための PI 制御(Proportional / Integral Control)です。積分については、必要とする時定数が長時間であるため PIC によるデジタル・フィルタを採用している所以です。

PI 制御であるため測定された遅延とオーバーシュートは避けることができない事象です。それらの特性を調整するには、比例制御については DAC 出力の抵抗分圧比を、積分制御についてはデジタル・フィルタによる時定数をプログラムされている 30 秒から 48000 秒を選択することで最適化します。

図-1 の特性はそれらの調整を一応行なった結果ですが、残留位相ゆらぎを小さくしたいために積分時定数を長め(1500秒)にしていることが OCXO の温度特性とミスマッチしていると考えられます。

図-2 において PLL が追従している場合の最大温度変化率を読取ると約 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C} / 1500\text{ 秒}$ です。オーバーシュートを生じている温度変化率は約 $4\text{ }^{\circ}\text{C} / 1500\text{ 秒}$ です。これらの値と使用している OCXO のカタログ仕様を比較すると以下のようになります。

- 温度特性 : $\pm 1 \times 10^{-7}\text{ max}$
[-10 ~ +60 $^{\circ}\text{C}$]

$0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度変化に単純換算すると 1.4×10^{-9} の周波数変化となり、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ では 1.1×10^{-8} となります。一方、Z3801A に内蔵されている HP 製の 10811 オシレータの特性は、

- 温度特性 : $2.5 \times 10^{-9}\text{ max}$
[0 ~ +71 $^{\circ}\text{C}$]

なるものです。同じような温度範囲で、そもそも二桁も特性が良

好です。本機と同じ制御回路と 10811 オシレータを用いた製作例では OCXO の温度特性は問題となっていないようですし、本機のように「普通の OCXO 」を用いた例では同様な事象が報告されています。

問題解決に向けて

本機的设计思想(あるいは動作原理)として、GPS 同期による発振器の安定度と精度の改善は長期的な要因に対するものであり、短期的な要因は発振器自身の特性に依存するものであることを再確認したような状況です。

問題の解決には二つのアプローチが考えられます。ひとつは、OCXO の温度特性を改善すること。もうひとつは、PLL の中に短期変動を追従するような制御を入れること、すなわち現状の PI 制御を PID 制御や多自由度化 PID 制御にすることや、PI 制御というフィードバック制御にフィードフォワード制御を追加すること等があります。

簡単には OCXO を HP 製 10811 オシレータ並みの特性の物に交換することでしょう。Poor man's 10811 OCXO を目指すのも一興ですが、その過程では PLL の制御自体を改善するのと同様に、OCXO の恒温槽の制御アルゴリズムの観点で PI 制御、PID 制御、フィードフォワード制御との対決が必要になります。物の道理からすると、PLL 以前に OCXO の特性を改善することが先決でしょう、、、

図-2 を改めて見直すと、室温の変化から遅延なく OCXO のケース内温度が変化していることに気づきます。OCXO に至るまでには、写真-1 に示すように、装置としてのケースと OCXO と搭載 PWB を囲んだシールドケース(写真中央)があります。シールドケース内では対流による熱伝導を防止する観点から、発泡スチロールを隙間に充填しています。したがって、室温変化から OCXO 内部の温度変化には遅延を生じると考えていたのですが、そうではないようです。

熱伝導には、コンダクション、対流、輻射がありますが、遅延がないことを考慮すると、本機の場合は輻射が支配的であると考



写真-1 : GPS 同期オシレータの内部

えられます。アクティブな熱制御とともにパッシブな熱制御も考慮する必要があります。アクティブ/パッシブでの総合的な断熱性能(サーマル・ゲイン)では、10811 オシレータはダブル・オープンで 1,000倍 (1 °Cの外気温変化に対して、内部では 1 ミリ °C)、最新技術ではシングル・オープンでも 100,000倍 を達成しているとのこと、驚異です。後者の数値は別の世界として、「目指せ、サーマル・ゲイン 1,000 倍」。

OCXO 自体よりも早く本来の目的である P5A を見据えての微弱信号処理に着手したい！

(つづく、、、)

