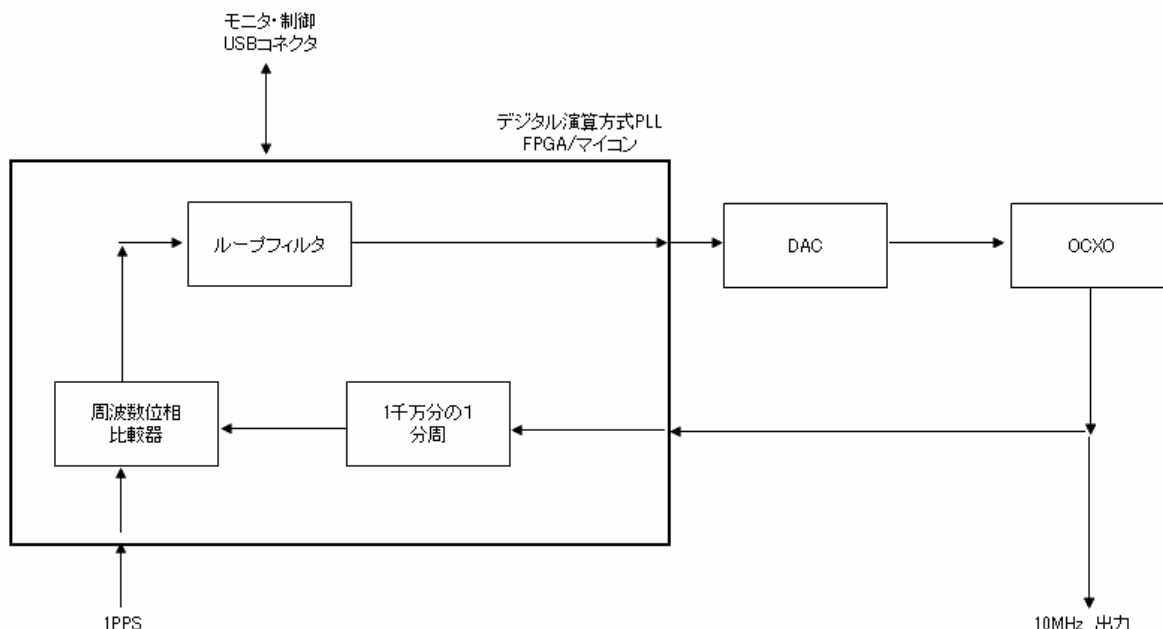


1. はじめに

様々な場面で周波数精度の高い 10MHz 基準信号が必要とされます。たとえば、ダブルオープン式の OCXO を使用して ppb 級 (10 の-9 乗) の精度を実現することができます。OCXO 以上の精度を要求する場合には、ルビジウム発振器や、GPS 同期の OCXO を使用します。ルビジウム発振器や、GPS 同期の OCXO は各社から製品が発売されています。

GPS モジュールと OCXO はアマチュアであっても比較的簡単に安価に入手することができますので、高精度の 10MHz 基準信号として GPS 同期の OCXO に着目しました。GPS モジュールと OCXO を組み合わせて 10MHz 基準発振源を試作しましたので、試作および実験結果をレポートいたします。

2. 試作する GPS 同期 OCXO のブロック図



今回試作した回路のブロック図を示します。主に、GPS モジュール、OCXO、OCXO を GPS に同期させる PLL 部で構成されます。

後述しますが、GPS に同期させた際の性能を十分に引き出すには、OCXO の裸の周波数安定度が良好である必要があります。OCXO は、MORION 社の MV89A-10.0MHZ を使用しました。MV89A の周波数安定度についての仕様を掲載いたします。

温度変動に対する安定度	±0.05 ppb
周波数エージング	±5ppb/year
1 秒間の短時間安定度	±0.002ppb
負荷・電圧変動に対する安定度	±0.1ppb
±50ppb に達するスタートアップ	15 分間
コントロール端子電圧と周波数可変域	0~5V ±250ppb

位相雑音

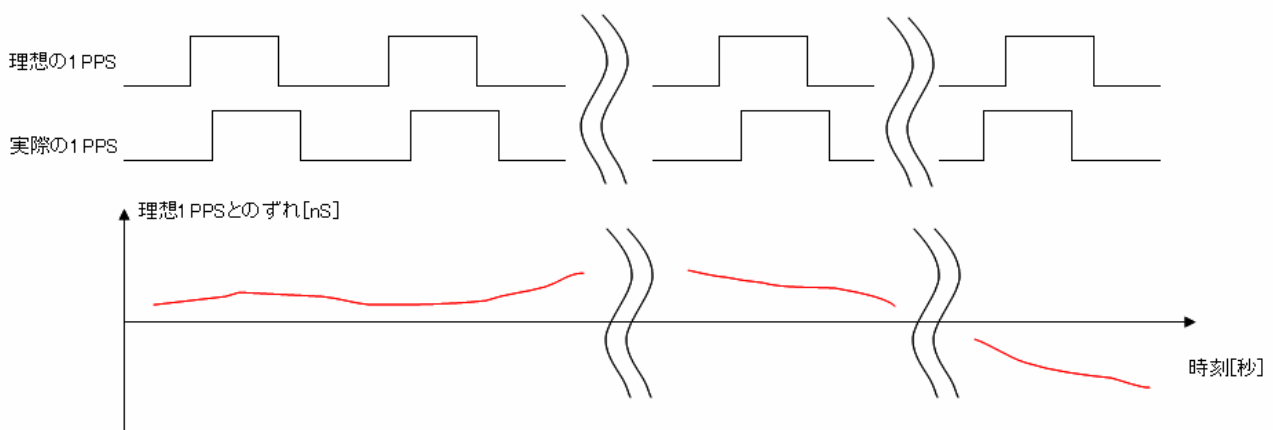
1Hz -105dbc/Hz
10Hz -130dbc/Hz
100Hz -145dbc/Hz
1000Hz -150dbc/Hz
10000Hz -155dbc/Hz

GPS モジュールは、1PPS パルス（1秒周期のパルス）が得られるものを使用します。発売されている GPS モジュールは、1PPS 出力を持たないものがほとんどですので、GPS モジュールを選ぶ際は注意が必要です。今回は、aitendo で入手できる GE-612T を採用しました。本原稿執筆時の価格は 3980 円（GPS アンテナは別売り）でした。1PPS パルスは GPS 衛星に搭載された時計に準拠した正確な 1秒周期です。OCXO の1千万分の1分周のパルスと、1PPS の位相が合うように PLL ロックをかけることで、OCXO から正確な 10MHz が得られます。OCXO は、PLL ロックをかけるために電圧コントロール端子を持ったものを選びます。今回の試作では PLL のループフィルタはデジタル演算で構成されています。デジタル演算された結果は DAC でアナログ電圧に変換されて OCXO のコントロール端子に印加されます。

後述いたしますが、1PPS パルスのジッター量と、OCXO の周波数安定度を加味した PLL ループ帯域の調整が必要になります。アナログ式のループフィルタの場合はループ帯域の調整は部品の交換で行いますが、デジタル式ではソフトウェアの書き換えで行うことができますので、ループ帯域の調整が容易です。また、デジタル方式の他のメリットとして、1PPS と OCXO の位相ずれの長時間のモニタリングや、DAC 電圧の長時間のモニタリングなどが、パソコンと USB で接続するだけで簡単に行うことができます。パソコンからはシリアルポートとして認識されますので、汎用のシリアル通信ソフトを使ってモニタリングを行います。GPS 同期の PLL ループ最適化には、長時間のモニタリングによる検証が必須となります。アナログ式のループフィルタの場合には、各種動作状態のモニタリングのために、高精度の電圧計、オシロスコープ、データロガーなどが必要です。

3. PLL ループの調整について

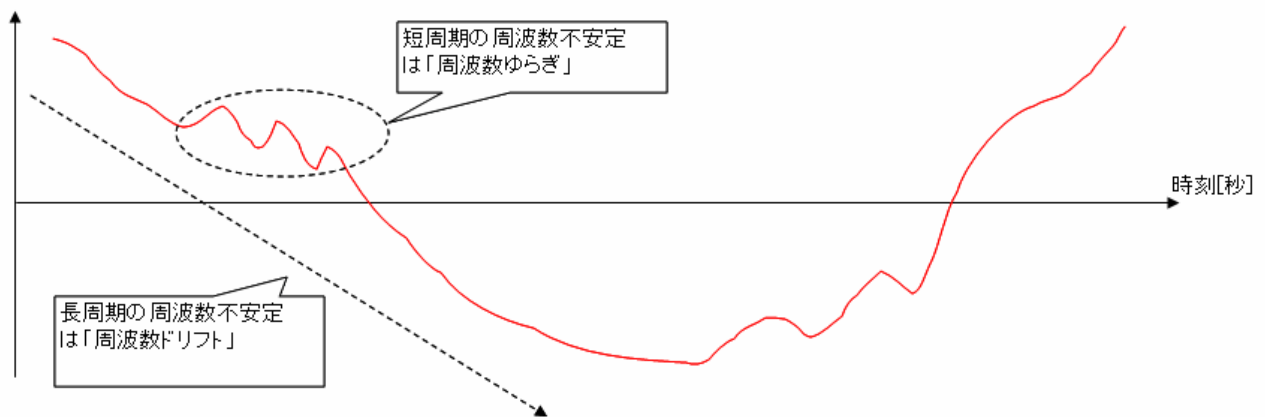
PLL ループを調整するには、1PPS ジッターと OCXO のフリーランの周波数ゆらぎを考慮する必要があります。



真の 1 秒周期のパルスに対して、1PPS が数 nS のオーダーで前後（ゆらぐ）しており、これを 1PPS

ジッターといいます。OCXO の 1 千万分の 1 分周とジッターあり 1PPS を完全に同期させると、OCXO にジッターがのってしまいます。ジッターがのった OCXO は数十秒の長時間で見ると正確な 10MHz ですが、1 秒などの短時間でみると 10MHz から僅かに周波数が前後して好ましくありません。そこで、1PPS を長時間の平均化により、ジッターを打ち消した後に OCXO の 1 千万分の 1 と同期させます。PLL のループ帯域を狭くするほど、1PPS の平均化の時間を長くして、1PPS のジッターの影響を少なくすることができます。

理想10MHzとの周波数ずれ[Hz]

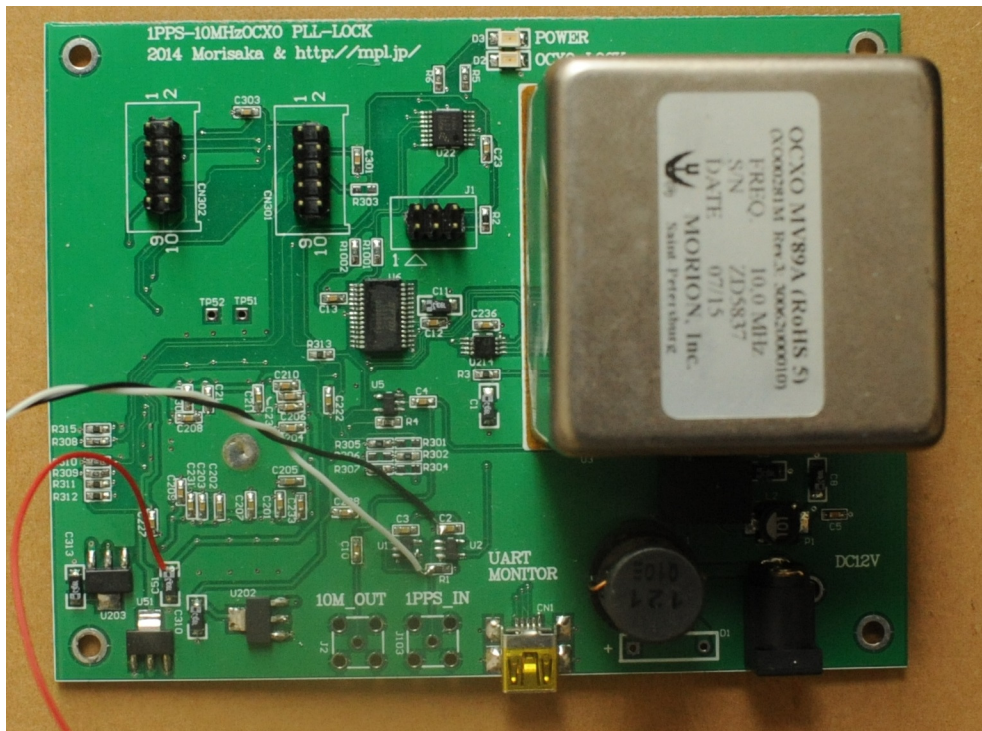


一方、ループ帯域を決めるには OCXO の裸の周波数安定度も考慮する必要があります。PLL ロック回路をはずした OCXO の裸の特性として、周波数ゆらぎと周波数ドリフトがあります。OCXO に対して 1PPS で PLL ロックをかけることで、周波数ゆらぎと周波数ドリフトを抑えこんで正確な 10MHz で安定させます。ループ帯域を狭めすぎると、周波数ゆらぎや周波数ドリフトを抑え込むことができずに、正確な 10MHz とはなりません。

まとめますと、1PPS のジッターの影響を抑えるにはループ帯域は狭いほうが有利で、OCXO の周波数安定度の影響を抑えるにはループ帯域は広いほうが有利です。ループ帯域は、1PPS ジッターと OCXO の周波数安定性の両方を評価したうえで、最適な値が決められます。GPS 同期 OCXO のループ帯域については各社メーカー独自のノウハウがあるようです。

PLL のループ帯域についての理論については、PLL の専門書に詳細が記載されています。[参考文献を挙げる]

4. 試作した GPS 同期 OCXO



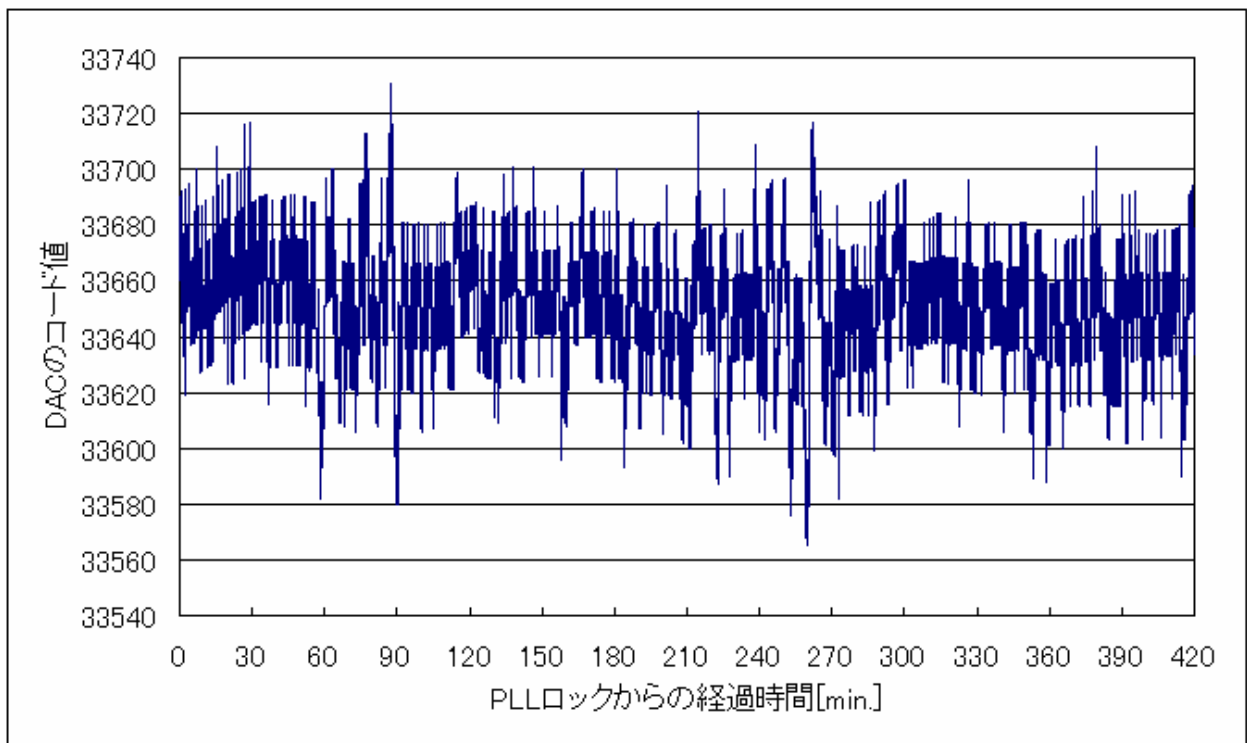
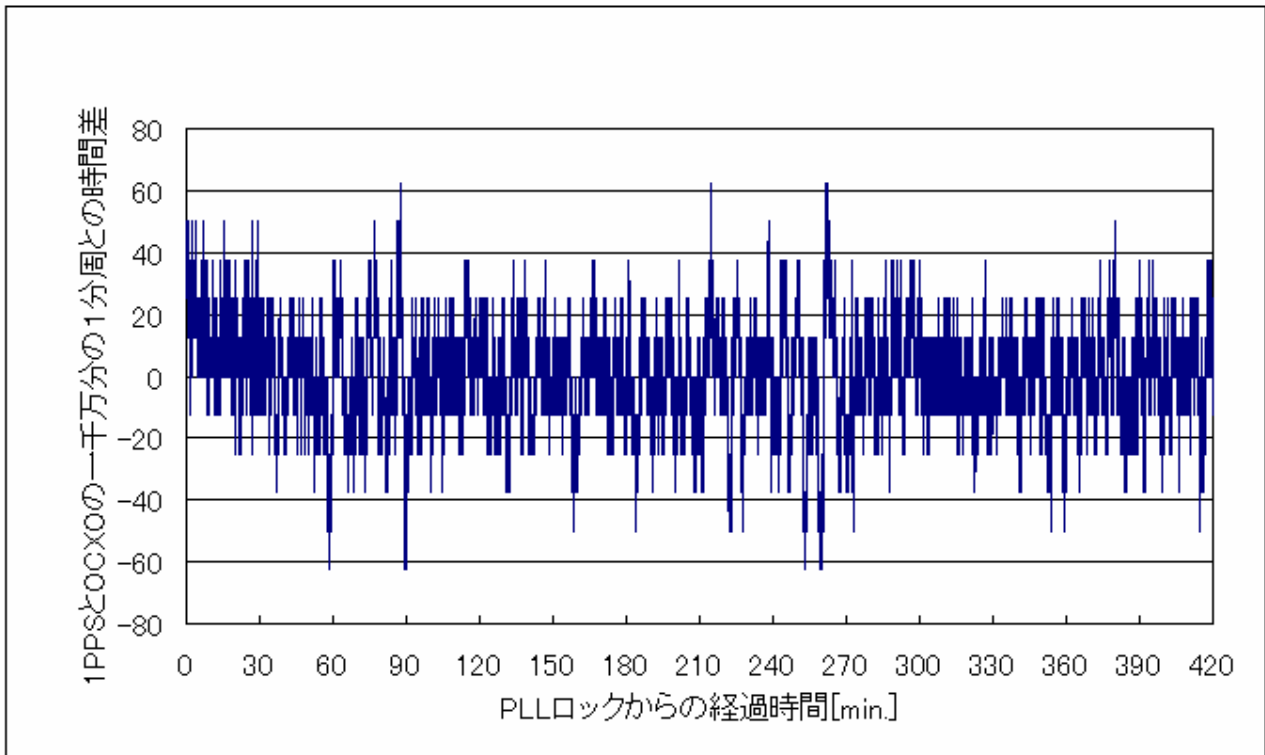
試作した基板を図に示します。基板上で OCXO が面積・体積・重量の多くを占めています。また、消費電流の多くを OCXO が占めています。OCXO のスタートアップ時には 1.5A、定常時は 350mA 流れます。

試作した基板の仕様は下記のとおりです。

電源	2.1mm 径 AC アダプタジャック DC12V-2A 以下
入力端子	GPS-1PPS SMB コネクタ(基板上でプルアップ、オープンコレクタの GPS に対応)
出力端子	10MHz およそ+7dBm SMB コネクタ
制御・モニタ	USB-miniB コネクタ PC に接続すると仮想コムポートと認識されます
サイズ	縦 120mm 横 92mm 高さ 45mm

5. 試作した基板の試用と評価

前述しましたように、GPS 同期 OCXO で最大限の性能を引き出すには 1PPS のジッターや OCXO の周波数安定度を評価しておく必要があります。OCXO の周波数安定度については OCXO メーカーのデータシートを参考にすればよいでしょう。1PPS のジッター評価については、次回のテーマといたします。今回 1PPS ジッターは評価せずに暫定で PLL ループ帯域を〇〇Hz としました。



試作基板では OCXO をウォームアップ時間 15 分経過した後で、さらに 30 分間かけて 1PPS と OCXO が PLL ロックしました。PLL ロックまでの所要時間はまだ改善の余地があると思われます。PLL ロックしてから 7 時間を動作させた時のモニタ値のグラフを示値のします。グラフ 1 は、1PPS と OCXO の 1 千万分 1 分周の立ち上がりエッジの時間差です。±80nS の範囲内に収まっており、1PPS と OCXO が同期できていることがわかります。グラフ 2 は、OCXO にかかる DAC 電圧のコード値です。DAC

は 16 ビットのものを使用しておりコード値の範囲は 0~65535 です。今回の試作基板では、ほぼ中間値の 33660 あたりでロックしました。DAC のコード値はゆっくりと揺らいでいて OCXO の周波数ゆらぎが PLL ロックによって補正されている様子わかります。

6. まとめと今後のテーマ

今回は 1PPS に対して OCXO が同期することが確認できました。次回は、同期した OCXO を eTtrace と比較し国家標準との周波数ずれを検証した結果をレポートする予定です。

また、今回使用した OCXO は体積・重量が大きく消費電力も大きいものでした。小型で消費電力の少ない OCXO を搭載してアマチュアでも使いやすい GPS 同期 OCXO も検討したいと思います。