

# 個別部品で組み立てて動作原理から設計法までを理解する PLL 周波数シンセサイザの設計法徹底解説

## 第3回 基準信号源の設計と製作その1

小宮 浩  
Hiroshi Comiya

PLL 周波数シンセサイザを動作させるのに必要な発振器は二つあります。基準信号源の発振器とループ内に含まれる電圧制御発振器です。

まずは基準信号源の発振器の製作を目指し、基準信号源に要求される特性と、基準信号源に使われる発振器を紹介します。

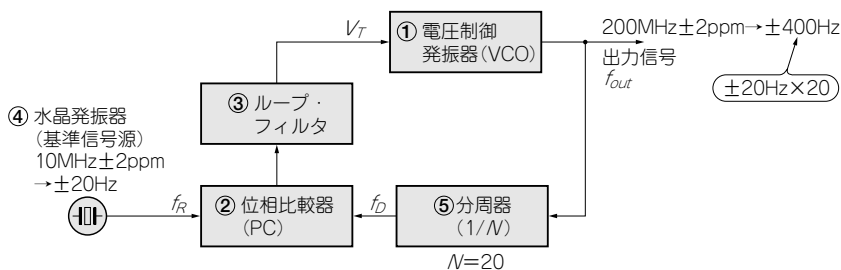
設計と製作を進める基準信号源として、周波数の調整が可能な水晶発振器である VCXO を選びました。

発振器を設計する前段階として、水晶振動子の特性と、水晶振動子を使って共振周波数の調整を可能にする方法を解説します。

### 基準信号源に要求される特性

図3-1に、基準信号源に水晶発振器を用いたPLL周波数シンセサイザの基本回路を示します。

ここで、分周数  $N$  を 20、基準信号  $f_R$  となる水晶発振器の発振周波数を 10 MHz とします。PLL が形成されると  $f_R = f_D$  が成立し、PLL 出力  $f_{out}$  には、基準信号の 20 倍の周波数である 200 MHz が出力されます。



PLL が基準信号  $f_R$  を  $N$  倍した周波数を作り出すが、位相雑音や安定度である周波数変動も  $N$  倍される

図3-1 基準信号源に水晶発振器を用いた PLL 周波数シンセサイザ

- カットオフ周波数より低いオフセット周波数での位相雑音は基準信号の  $N$  倍

前回(第2回, 2006年4月号)の図2-8で解説したように、PLLのカットオフ周波数より低いオフセット周波数での出力位相雑音は、基準信号源である水晶発振器の位相雑音を  $N$  倍した値になります。したがって基準信号源に使う水晶発振器の位相雑音は重要です。

- 出力周波数の安定度も基準信号で決まる

PLL 周波数シンセサイザ出力の周波数安定度は、基準信号源の安定度で決まります。

周波数安定度が動作温度範囲において  $\pm 2$  ppm の基準信号を使うと、PLL 周波数シンセサイザの出力でも  $\pm 2$  ppm の安定度となります。ppm とは parts per million の略で、 $10^{-6}$  を示す単位です。

例えば、図3-1で、基準信号源の 10 MHz 水晶発振器に周波数温度特性が動作温度範囲  $-10 \sim 60^\circ\text{C}$  で  $\pm 2$  ppm のものを使ったとします。

10 MHz の  $\pm 2$  ppm ですから、基準信号源の温度特性は  $\pm 20$  Hz となります。

分周数  $N = 20$  で出力周波数が 200 MHz とする

### Keywords

VCXO, TCXO, OCXO, 周波数安定度, 温度特性, エージング特性, ウォームアップ特性, リトレイス特性, 水晶振動子

と、 $\pm 20$  Hzの温度特性も20倍されるので、出力周波数200 MHzでの温度特性は $\pm 400$  Hzとなります。比で表せば、 $400 \text{ Hz}/200 \text{ MHz} = 2 \times 10^{-6}$ 、すなわち $\pm 2$  ppmの温度特性になります。

### ● 基準信号源として重要なのは安定度と位相雑音

基準信号源の特性がPLL周波数シンセサイザの出力に現れるのが上記二つの特性です。

逆に言えば、周波数安定度と位相雑音、この二つの特性が、基準信号源に要求される特性です。

## 基準信号源に使える水晶発振器

### ■ どのような水晶発振器が使えるか

高周波のPLL周波数シンセサイザを設計するとき、基準信号源として用いられる水晶発振器は、以下の三つが代表的です。

- ① VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator)
- ② TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator)
- ③ OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator)

### ● それほど性能が要求されない用途にはVCXO

水晶振動子に可変容量ダイオードを追加して、外部電圧により発振周波数を制御できるようにしたものです。可変容量ダイオードは、バラクタ・ダイオードまたはバリキャップとも呼ばれます。

VCXOは基準信号源に使われる水晶発振器としてもっとも一般的です。周波数温度特性をあまり重要視しない、具体的には動作温度範囲において $\pm 100$  ppm以下であればよいPLL周波数シンセサイザに用いられます。

#### ▶ なぜ電圧制御による周波数可変が必要なのか？

水晶発振器は、それ自体周波数精度の高い発振器で

す。しかし、さらに絶対精度を高くするために、周波数の微調整が必要になる場合があります。

昔は、周波数の制御にトリマ・コンデンサを用いたメカニカル・チューニングが普通でしたが、今はPLLへの利用も含め、電子チューニングが求められるので、外部電圧により制御できるものが一般的です。

### ● 温度特性が重要ならばTCXOを採用する

温度変化による周波数の変動を補償する回路を搭載した水晶発振器です。

温度センサから作った補償電圧をVCXOの制御端子に加えて、周波数の温度変化を小さくしています。

周波数温度特性に対する要求が厳しく、動作温度範囲において $\pm 1$  ppm～ $\pm 10$  ppm程度が必要な場合は、VCXOに替えて、TCXOを選択します。

### ● さらに良好な温度特性が必要ならばOCXO

TCXOと同様に、温度に対する安定度を高めた水晶発振器です。

この方式は、水晶振動子を含めた発振回路全体を、オープンと呼ばれるヒータ付きの恒温槽の中に封じ込め、内部の温度が一定になるように制御(Oven Controlled)することによって、周波数の温度特性を安定化させています。

PLL周波数シンセサイザ出力の周波数温度特性に、動作温度範囲において $\pm 1$  ppm以下が必要であれば、TCXOに替えて、OCXOを選択します。

#### ▶ 高安定なほど大形で高価、消費電力も大きい

写真3-1に、OCXOとTCXOの外観を示します。

高安定なOCXOほど、恒温槽の作りが大規模で高額になり、消費電流も多くなります。

また、水晶そのものも、一般的に使われるATカットと呼ばれるタイプから、より温度安定度の高いSCカットになり、これも値段の上がる一因です。

むやみに安定度の高い製品を選択するのは得策ではなく、PLL周波数シンセサイザとして必要とされる安定度を把握して、選択することが求められます。

### ● 実際のOCXOの特性

最高水準にある高性能OCXOがどの程度の特性にあるかを調べてみましょう。基準信号で重要な特性は、周波数安定度と位相雑音でした。

ここでは周波数温度特性とSSB位相雑音をとりあげます。

#### ▶ 高安定度のOCXO

図3-2に、SCカット水晶を用いた10 MHz高安定OCXOの周波数温度特性をデータ・シートから引用しました。 $-30 \sim +70$  °C間で、 $\pm 5 \times 10^{-10}$ の安定度を維持しています。

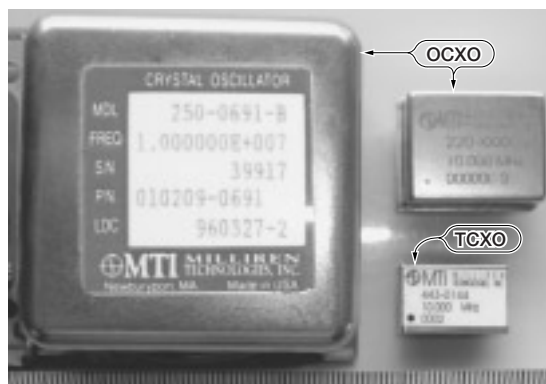


写真3-1 OCXOやTCXOの外観