

GPS Disciplined Oscillator
GPS 同期オシレータ — 製作編
武安義幸 / JA6XKQ

2002年、米国の携帯電話基地局に使用されていたGPS同期オシレータ Z3801A が中古市場に出現し、アマチュア無線界(の一部)でもにわかにブームとなりました。その中古価格は性能からすると信じ難いほどの低価格であり、送料のほう馬鹿にならないということで、グループ購入の話も耳にしました。しかし、以前より自作を考えていたため、「買って置いて損は無い」と思ったものの、ついに手を出さずじまい。Z3801A が中古市場



写真-1 : GPS 同期オシレータの外観

をにぎわしたのは半年ほどだったでしょうか、、、今では入手も困難であり、あったとしても高価な値付けで以前の安値を知っているだけに手が出ません。

考えていた自作とは、1998年に Brooks Shera / W5OJM が QST 誌に発表した“A GPS-Based Frequency Standard”。[1] 2002年の秋には主要な部品を揃えて、あとは基板の設計/製作、というところで興味が別に行ってしまう、完成が今頃(2005年10月)になってしまいました。「作れば終わり」とはなりそうになく、魂を入れる苦勞を楽しめそうです。(と、2005年10月に本文を書き始めたのですが、2006年2月現在でも魂はさまよっています、、、)モノは単なるオシレータ、手段であって目的ではありません。その先にお楽しみが待っています。

1998年設計の、このオシレータを今頃に製作するのは部品入手の観点で、かなりの困難を伴います。2002年の時点で既にそうでしたので。仮に入手できたとしても、その部品代(と苦勞)は、2002年当時の Z3801A の中古価格を上回るものとなることでしょう。したが、Poor man's シリーズを標榜する者としては、当初考えた“Poor man's Z3801A”なるタイトルを冠することはできません。このオシレータをそっくり真似るよりも、原理だけを拝借して、新しいデバイスに置換することが得策でしょう。それを踏まえて本文を読んでいただきたく思います。

2005年10月より本文を書き始め、平行して実験を継続していましたが、「そっくり真似」しているつもりがそうではないことが次第に判ってきました。真似るための勘所は稿を改めることにして、製作過程をまずは記録に残すことにします。

参考文献

このオシレータは発表された直後から多くの方が自作し、その製作過程がインターネットで公開されています。このオシレータの自作には勿論のこと、「時間と周波数」に興味がある方は自作に関係なく一読されることをお勧めします。意図した訳ではありませんが、すべて海外となってしまいました、、、

[1] Brooks Shera's GPS-Controlled Frequency Standard
http://www.rt66.com/~shera/index_fs.htm

[2] GPS Disciplined 10 MHz Oscillator
<http://www.jrmiller.demon.co.uk/projects/freqstd/frqstd.htm>

[3] How To Build Jimmy's Version Of 10 MHz / GPS Frequency Standard
http://home.teleport.com/~oldaker/10mhz_construction.htm

[4] High stability Frequency Standard
<http://www.microwave.fsnet.co.uk/projects/projects-2.htm>

[5] GPS Notes
<http://members.ispwest.com/kd7ts/html/GPSPLL/gpsindex.html>

[6] Dick Moore's version of Brooks Shera's GPS-Disciplined Master Oscillator
<http://moorepage.net/page1.html>

[7] GPS Disciplined Frequency Standard
<http://www.qsl.net/kc9asu/projects/gps-ref.html>

動作原理

軽く、その動作原理をおさらいしておきましょう。図-1に機能ブロック図を示します。

一言で言えば PLL (Phase Locked Oscillator) です。位相検出器としてタイム・インターバル・カウンタ (Time Interval Counter) を使用しています。図中で ϕ と示したものは、RSフリップ・フロップによる位相検波器で、GPSからの1秒パルス (1PPS: Pulse Per Second) と VCXO との位相差をパルス幅として出力

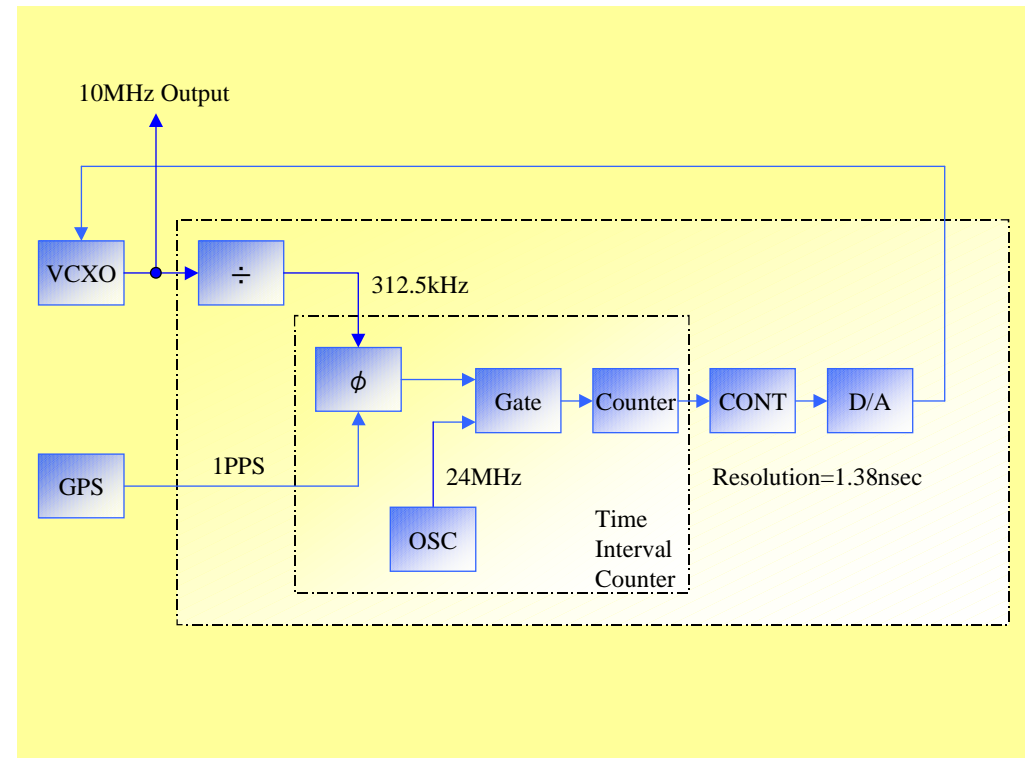


図-1 : 機能ブロック図

します。そして次段の OSC/Gate/Counter でパルス数へ変換して後段の PIC マイコンによる CONT で読取っています。CONT はパルス数が一定になるように、すなわち 1PPS と VCXO の位相差が一定となるように D/A コンバータで VCXO の周波数制御電圧を調整します。

はじめに発振器ありき

このGPS同期オシレータを自作するつもりなら、最初に行なうべきことは高安定度の発振器を入手することです。GPS同期オシレータの目的は高安定度/高精度な発振器を構成することですから、そこに高安定度の発振器が必要とは、一寸、あれっ？という気がするかもしれません。高安定度という定義を数値で表現しないと誤解を与えてしまいます。安定度と精度の定義については数値を交えながら、実測データの評価の際に改めて議論したいと考えています。

ここでは、裸の水晶発振器、すなわち温度変動対策を行っていない水晶発振器ではGPS同期の恩恵にはあずかれない、という程度の理解でよいでしょう。温度変動対策を施した OCXO (Oven Controlled X'tal Oscillator = 恒温槽付き水晶発振器) が必要です。

GPS受信機の 1PPS パルスで水晶発振器を躡る(しつける = Disciplined) のですが、「そこでじっとしていなさい」と躡っている間に水晶発振器がやんちゃに暴れまわっては躡にならない、、、という具合なので、高安定度 = ある程度じっとしてられる我慢

強さが必要なのです。

使用した OCXO のカタログ仕様値を参考として掲げます。

- 標準公称周波数 : 10 MHz
- 短期安定度 : 1×10^{-9} max
[$\Delta f/f(2, \tau)$ 1秒平均]
- 経年変化 : $\pm 2 \times 10^{-8}$ max/day
 $\pm 1 \times 10^{-7}$ max/year
[電源投入24又は48時間後の周波数を基準として]
- 温度特性 : $\pm 1 \times 10^{-7}$ max
[-10 ~ +60 °C]
- 電源変動特性 : $\pm 6 \times 10^{-8}$ max
[+12V \pm 10%]
- 周波数補正範囲 : $\pm 2 \times 10^{-6}$ min/+5V \pm 3V
[外部電圧にて]

ここで着目すべき項目は、前述の観点から短期安定度です。また、当然ながら、外部から電圧で周波数制御可能な VCXO (Voltage Controlled Oscillator) であることが必須です。制御電圧に対する周波数変化の感度は実測が必要でしょう。

特性検討の別項にて詳述しますが、ここに掲げている温度特性ではオリジナルの設計(PLLのループ・ゲインとループ帯域)とはマッチしないようです。オリジナルの設計をそのまま真似るには、Z3801A に内蔵されている HP 製の 10811 オシレータの性能が必要との感触を得ています。

なお、OCXO に外部電圧調整を追加する改造については、参考文献 [4] のホームページに掲載されています。

何処にあるのやら D/A コンバータ

OCXO については特に品名指定はありません。入手できたものに対応するように、回路定数の一部を調整することが可能です。一方、OCXO に制御電圧を与える D/A コンバータは、制御用マイクロ・プロセッサのプログラムを変更しない限り、オリジナ



写真-2 : PCM-61P 搭載のPCサウンド・ボード 2種

ルで指定された品名が必須となります。それは、Burr Brown 社製のPCM-61P であり、既に廃品種となっています。

そのPCM-61Pはオーディオを本来の用途とするものであり、製造中止後もこの2年(2003年後半～2005年前半)ほど、国内のマニアが頒布したオーディオ DAC 自作キットに採用されていたので、もしかしたら流通在庫が入手できるかもしれません。

流通在庫以外の入手ルートは、オーディオ機器のジャンクです。「PCM-61P」でインターネット検索すると、この D/A コンバータを搭載していた製品名がヒットします。その中には PC のサウンド・ボードもあり、筆者の場合、PC-9801 シリーズのものを近所のリサイクル・ショップで運良く入手することができました。

PCM-61P の入手自体が本機の成否を決めるという皮肉な状況です。PIC マイコンのプログラムができる方は、本機の原理を拝借して、入手可能な D/A コンバータにアレンジすることが得策です。オリジナルの作者である Brooks Shera / W50JM はソースコードを提供するとのことなので、D/Aコンバータ対応のためには快諾してくれるものと期待されます。

PIC マイコン

本機の制御をつかさどる PIC マイコンには、PIC16C73A が指定されています。「73A」は廃品種ですが、「73B」で代替可能です。入手性に特に問題はないでしょう。

さまよえる GPS 受信機

GPSというと専ら位置情報取得が目的であり、時刻情報はその位置情報のタイム・スタンプとして共にシリアル・ポートから出力されるのが一般的です。しかし、ここでのGPS受信機には 1PPS 出力付きが必要となりますが、その入手は一般的とは言い難い状況です。こうやって要素部品を連ねてみると、技術的な難しさ以前に部品自体の入手性の問題が大きく立ちはだかり、自作するにも、それを書き綴るにも大きな溜め息が出てしまいます。



写真-3 : GPS 受信機 — VP Oncore (左)、Jupiter-T(右)

Z3801A には MOTOROLA 社 Oncore シリーズのGPS受信機が搭載されており、1PPS の精度が良いとのこと。なるほど、カタログによるとその精度が他製品と比較して一桁良いことが判りました。それではと、6チャンネル受信の VP Oncore の流通在庫(中古品)を米国から2002年に購入しました。

その MOTOROLA 社も GPS 事業を2005年に他社へ売却し、ボード・レベル受信機の入手も苦労します。2006年2月現在で入手可能な機種としては Conexant 社 Jupiter シリーズがあります。オリジナル開発社名の Rockwell やモデル名の TU30-D140 で検索してみると幾つかヒットします。Jupiter シリーズには 1PPS の他に同期 10kHz 出力があり、本機とは異なった方式で GPS 同期オシレータを製作することが可能です。文献 [2] に製作例があります。

プリント基板には救いの手が

主要部品には入手難という壁が立ちはだかりますが、プリント基板が QST 発表の1998年より販売されており、今でも購入することができます。

A & A Engineering
<http://a-aengineering.com/>

メールで送料確認の問合せをしてFAXで(クレジット・カード番号の安全のために)注文書を送付、2週間で現品を受領しました。長年の供給に感謝する次第です。

ユニバーサル基板に手配線も可能な範囲ですし、自分で基板設計して今流行りのオンライン基板屋さんへ発注するのも良いでしょう。

お世話になって文句を言うつもりはありませんが、このプリント基板のパターン、24 MHz までの高周波と 18 ビットの D/A コンバータを取扱うデジ・アナ混在回路としてはグラウンド・パターンとパソコンへの配慮が足りないような気がします。いわゆる「乾いた基板」という印象です。しかし、何も実害はありませんが、、、パソコンとしては、高周波回路には周波数特性の良いものを、1PPS を取扱う回路には容量を大きくするというささや

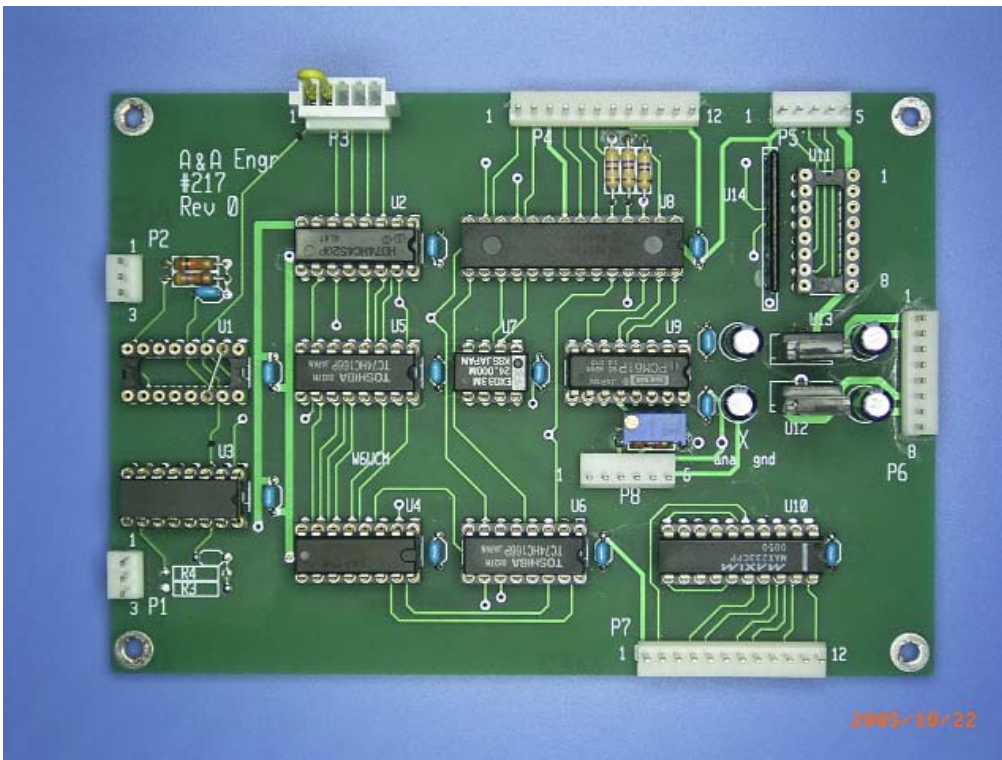


写真-4 : 部品を実装した制御部のプリント基板

かな気配りをしてみました。

それよりも重要な点として、シルク印刷に誤りがあります。回路符号で R5 と R6 がQST掲載の回路図とは逆になっています。これを間違えると、PLLは絶対にロックしませんのでご注意ください！（経験者は語る、、、）

意外と面倒、でも重要な電源

QSTの記事では電源回路については記載されていません。各自の取り揃えた部品、特に OCXO の都合で電源回路を設計/製作することになります。

各要素部品で必要とする電源は、

GPS受信機	:	+5V / 220mA
制御基板	:	+5V / 65mA、-5V / 10mA
OCXO	:	+8V、+12V / 900mA

となります。デジ・アナ混在であり、ノイズによるオシレータの位相雑音の劣化に配慮することが肝要です。どれくらいのレベルかというと、18 ビットの D/A コンバータで $\pm 3V$ の制御を行なっていますので、分解能は $23\mu V$ となります。改めて数値で書いてみて、自分でも恐ろしくなっていました。（配慮は足りているのか、、、？）

制御基板の $\pm 5V$ は D/A コンバータで使用されているため上

記の配慮が必要です。特に+5Vはデジタル回路と共用されているため、なお更です。

OCXO の消費電流のほとんどはオープンヒーターです。これは使用する部品次第であり、本項で掲げた数値は参考でしかありません。OCXO によっては、ヒーター電源電圧とオシレータ回路の電源電圧が分離されているものもあります。OCXO の +8V は制御電圧用電源であり、D/Aコンバータの電源とともにオシレータの位相ノイズに影響を与えるものです。消費電流自体は無視できるほどのものです。

-5V電源は消費電流も小さいことから単独でACから生成することはやめて、DC/DC インバータ(ICL7660)で正電源から生成することとしました。インバータの後段にはノイズ低減の目的からシリーズレギュレータ(三端子レギュレータ)を入れています。電源部の構成を図-2 に示します。アナログ回路へはシリーズレギュレータで電源を供給しています。

写真-5 は電源部であり、下段が +15V から +5V を生成するスイッチングレギュレータ、上段がその他のレギュレータをまとめたものです。

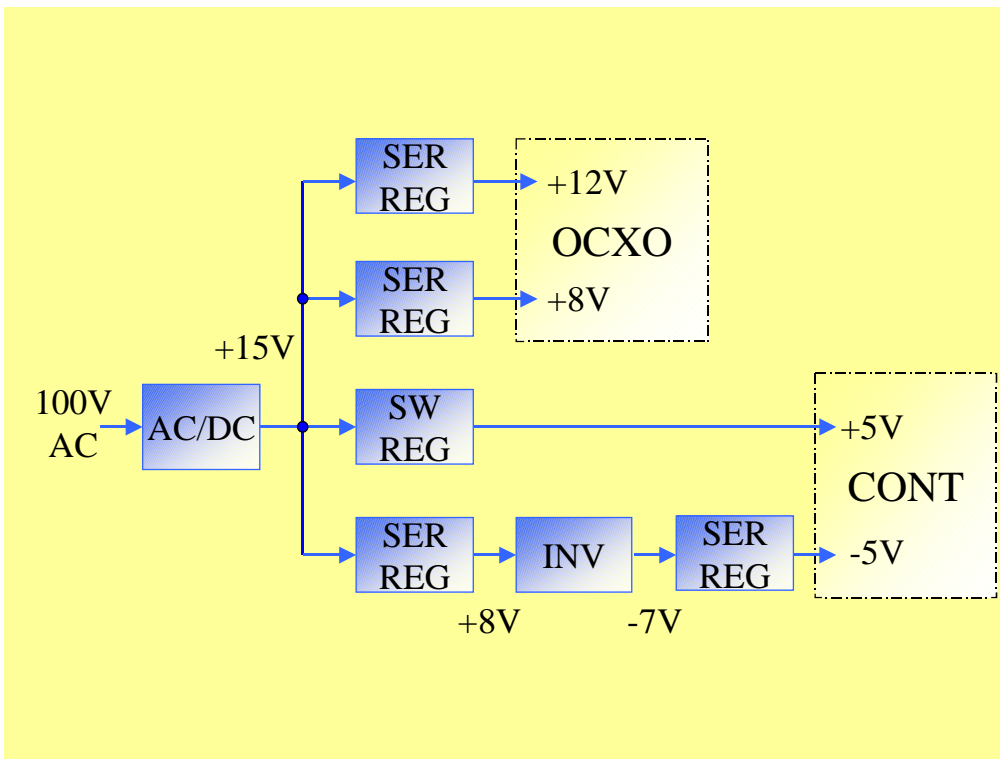


図-2 : 電源部の構成

(C) 2006, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

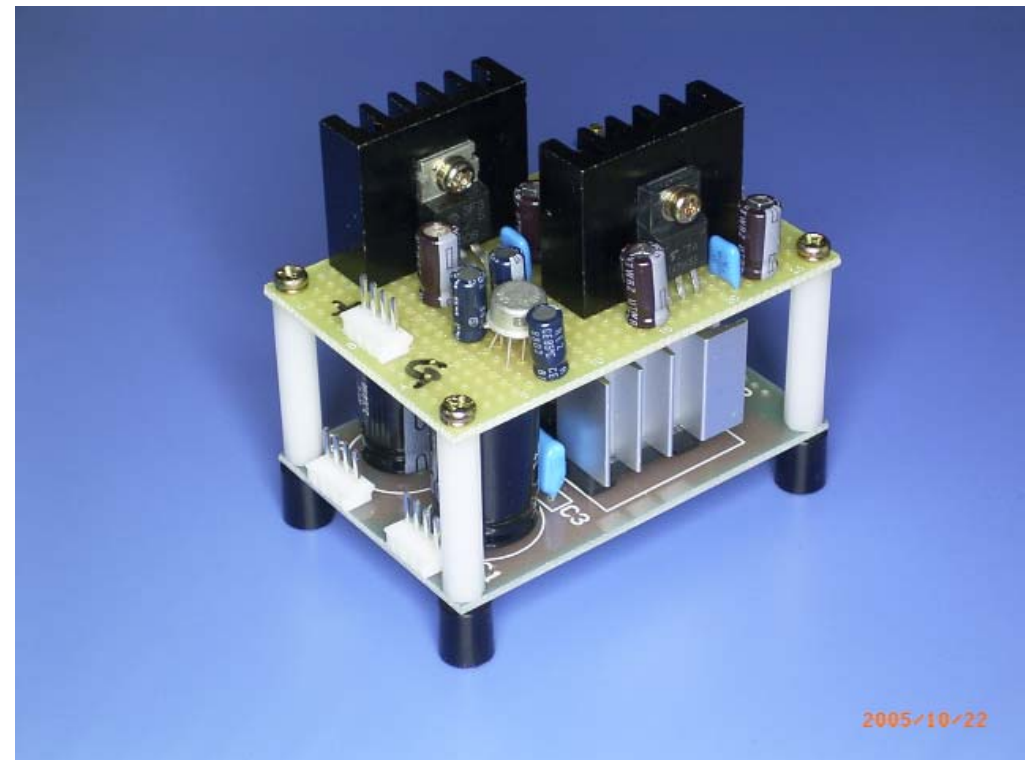


写真-5 : 電源部

(C) 2006, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

全体のまとめ

写真-6 に内部を示しますが、まだ余裕を残しています。理由は、10MHz 出力に分配用バッファアンプを追加すべきこと、また、OCXO の恒温対策を強化したいためです。

細かい点としては、制御用プリント基板に実装するディップ・スイッチ(制御パラメータ変更用)は、写真-1 に示すようにサム・ホイール・スイッチ等でケース前面へ拡張すべきです。制御パラメータを確定する過程で頻繁に操作する必要があるからです。

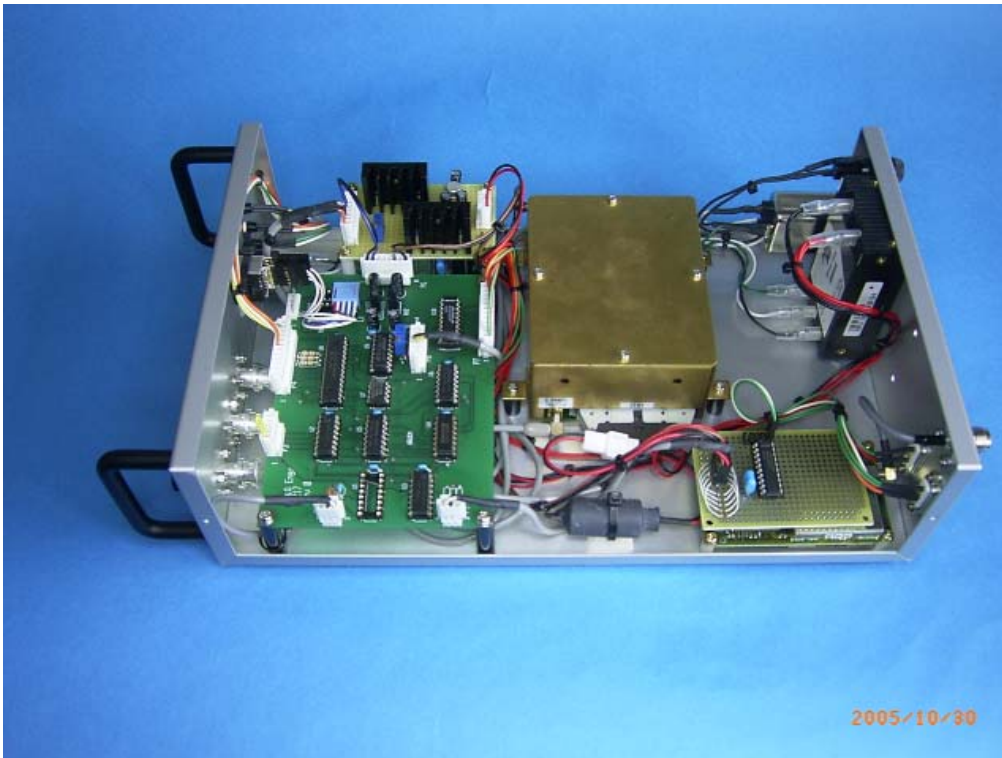


写真-6 : GPS 同期オシレータの内部

このアイデアは、文献 [2] から拝借しました。

GPS受信機のパラメータ・バックアップ用電池への配線には途中にコネクタを設けて、電池交換が簡単にできるようにしておきましょう。

OCXO 本体に制御電圧の粗調整用の半固定抵抗器がある場合には、実装状態でそれにアクセスできるように配置を考慮しましょう。筆者はそれを死角に配置してしまい、、、以下略。

はじまりのあとがき

作りたいと思ってから部品入手に手間取っただけに、その後は簡単に「作りました、動きました」となって、その先のアプリケーションの話へ行きたかったのですが、簡単な話しではありませんでした。またもや長い放浪の始まりです。放浪記は稿を改めて、、、

本文の最後に、PICマイコンのプログラム焼きをお願いし、また本文に関連して筆者の与太話にお付き合い頂いている JF1WKX / 勝間さんに感謝します。

(続く、、、)

