

Rb 原子発振器の位相雑音の測定

松田 勲 佐多 知治 西尾 真次

Measurement of the Phase Noise of Rb Atomic Oscillators

Isao MATSUDA, Tomoji SATA, Shinji NISHIO

One gauge of the performance of electronic devices which require high stability is their frequency stability. Frequency stability can be expressed in two ways: in the time domain and in the frequency domain. Phase noise determines short-term stability in the frequency domain and is an essential factor in evaluating device performance.

In this study, we evaluated the short-term frequency stability of high-stability oscillators by a phase noise measurement system. The phase noise of two Rb atomic oscillators were measured against a reference 5 MHz crystal oscillator using a HP 3048 A phase noise measurement system.

The two atomic oscillators showed almost the same characteristics. Below a Fourier frequency of 10 MHz, the phase noise of the oscillators was smaller during free running than under control. It is considered that the control applied for reducing the effect of aging of the crystal oscillator in the atomic oscillator increased the phase noise in the low Fourier frequency range.

1. 序論

近年高周波における高性能エレクトロニクス機器の開発がなされているが、それらには、ローノイズ、高帯域そして高安定性能が要求されている。その中でも高いスペクトラム純度を持った発振器やローノイズの増幅器の開発が問題となっている。また、超高安定発振器の周波数安定度には、時間領域と周波数領域の2つの表現があるが、周波数領域での短期安定度である位相雑音に関して、JIS規格制定作業が進められている⁽¹⁾。このような背景の中で位相雑音の測定は、機器及び電子回路の性能を評価する上で非常に重要かつ必要不可欠と考えられる。

本研究では位相雑音測定システムを使用してそれにより高安定周波数源の周波数安定度の評価を行った。位相雑音は周波数領域における周波数の不確定さであって、本システムではキャリア信号の周波数変調スペクトラムを測定し、0.01 Hz以上の変調の短期周波数安定度（数秒程度の周波数変動）を測定した。短期周波数安定度はある一定時間内（数ミリ～数秒）における平均周波数からの偏差と考えることができる。測定では横河ヒューレットパッカード株式会社製のHP3048A位相雑音測定システムを使用した。

2. システムの構成^(2,3)

本システムは、HP11848A位相雑音インタフェイス、HP3561Aダイナミック・シグナル・アナライ

イザ，システムソフトウェアで構成され，位相雑音インタフェースには位相検波器，フィルタなどが入っており，ダイナミック・シグナル・アナライザは信号源の雑音を測定し，ソフトウェアはシステムを動作させてデータを取り込み，解析を行うために必要である。

システム構成図を図 1 に示す。

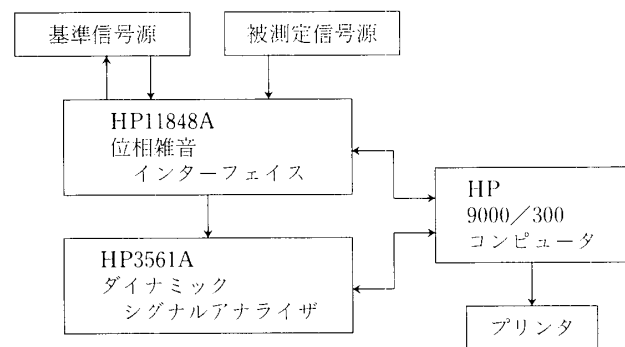


図 1 システム構成図

本システムは 5 MHz～1.6 GHz までの周波数レンジで 0.01 Hz～1 MHz オフセット周波数で -170 dB/Hz の位相雑音測定ができ，測定精度は ±2 dB と高感度である。アラン分散（時間領域における短期周波数安定度）等の表示ができ，さらに，増幅器の付加雑音や振幅雑音等も測定できるので信号源の解析，評価が確実に行える。

3. フェーズロックループ法（PLL 法）

JIS 規格においては PLL 法を採用する方向で制作業が進められており⁽¹⁾，本研究でも PLL 法を採用することにした。PLL 法は基準信号に対して被測定信号源の雑音を測定する方法である。この方法は完全に独立した同じ周波数を出力する信号源が 2 台必要であり，1 台の信号源は 90° 位相差を維持するために DC 電圧制御が可能でなければならない。システムの感度は基準信号源の雑音に依存する。PLL 法によるシステム構成図を図 2 に示す。図 2 に示すように，まず 2 つの発振器の出力信号を位相検波器（Phase detector）に入力し，両発振器の差周波数成分を低域ろ波器（Low-Pass Filter）を介して取り出す。この出力中の低周波数成分をフェーズロックループ制御回路を用いて 5 MHz の電圧制御発振器に入力し，両発振

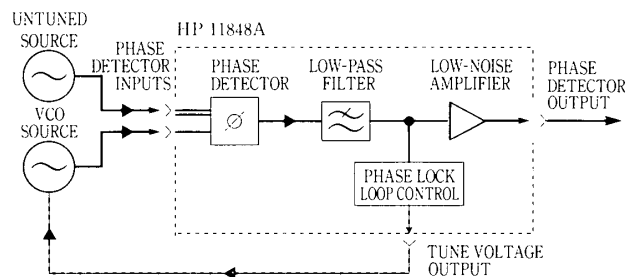


図 2 PLL システム構成図

器の固定位相差を 90° に保つように制御する。このとき低域ろ波器の出力には両発振器の瞬時位相差に比例する電圧が得られるので^(4,5)，この電圧を HP3561A ダイナミック・シグナル・アナライザを用いて測定することにより位相雑音を測定することができる。

4. 位相雑音の表現

信号源は，信号の振幅と周波数の関数で表される。ここでは理想的な信号源を

$$V(t) = A \sin(2\pi\nu_0 t)$$

A：キャリアの振幅

ν_0 ：キャリアの周波数

として表す。ここで信号に位相変動がかかっていると sin 関数の中に位相変動が加わると。この位相変動を $\phi(t)$ とすれば，位相変動のかかった信号源は

$$V(t) = A \sin(2\pi\nu_0 t + \phi(t))$$

のように表すことができ，この $\phi(t)$ が測定すべき位相雑音である。

位相雑音を表す最も一般的な値は SSB 位相雑音といわれる $\mathcal{L}(f)$ である。 $\mathcal{L}(f)$ はキャリアから f Hz 離れた点での電力を 1 Hz 帯域幅で正規化し，キャリアからの電力差で表現する。このような表現を用いると， $\mathcal{L}(f)$ は 1 Hz 帯域幅の信号を総信号電力で割った値と同じになり，次式で表すことができる^(2,3)。

$$\mathcal{L}(f) = \frac{1 \text{ Hz のバンド幅の電力}}{\text{スペクトラムの全電力}} [\text{dBc/Hz}]$$

5. 測定結果および考察

HP 3048 A 位相雑音測定システムで，自作の 5 MHz の電圧制御可能な高安定水晶発振器を基

準にして、2台のRb原子発振器の位相雑音を測定し、周波数安定度の比較検討を行った。

Rb原子発振器は、Rb原子の原子共鳴周波数を基準にして内蔵の水晶発振器の周波数を制御している。制御をかけない場合には、水晶発振器のもつすぐれた短期周波数安定度の特性をそのまま生かし、制御をかけることによって、経時変化をRb原子の共鳴周波数の安定性にまで少なくしようというものである。Rb原子発振器No.1およびNo.2の位相雑音の特性をそれぞれ図3-1, 2に示す。まず原子発振器内蔵の水晶発振器に制御をかけない場合、フーリエ周波数が1~500 Hz位までは両者はほとんど同じ特性を示しているが、それ以上の周波数ではNo.1では、位相雑音はほぼ平坦になっているのに対して、No.2は周波数が高くなるにつれて位相雑音が小さくなっていき、10 KHzでは10[dBc/Hz]だけNo.2の方が小さい。また内蔵の水晶発振器に制御をかけた場合は、約3 Hz以下では2台とも逆に位相雑音が大きくなっておりNo.2の方が10[dBc/Hz]も大きくなっている。これ以上の周波数では、位相雑音は制御をかけない場合とほぼ同じとなっており、水晶発振器のすぐれた短期安定度がそのまま保持されていることがわかる。制御をかけたために約3 Hz以下で位相雑音が大きくなるのは、Rb原子の基準周波数をもとに長期安定度を改善するために制御系に加えた制御の影響が、時定数などの影響でこの部分に現れているものと思われる。さらに低い周波数における解析を行えば、制御の効果が

現れて位相雑音が小さくなっている結果が得られるものと思われる。また図3では50 Hzおよびその整数倍の周波数にスプリアスが現れているがこれは電源から入り込んだ雑音と思われる。以上のことより位相雑音の点からはNo.2の方が短期周波数安定度がすぐれており、フーリエ周波数1 Hz前後の変動に対してはNo.1の方がすぐれた特性をもっていることがわかる。次にアラン分散の特性を図4に示す。アラン分散については、ゲートタイムが $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1}$ 秒迄の範囲で値を算出してみたが、この範囲ではフーリエ周波数がほぼ10 Hz以上の高い周波数成分に相当する部分であり制御をかけた場合とかけない場合ではほとんど差は生じなかった。これは前述したように、このゲートタイムの範囲では制御による位相雑音の変化もほとんどなく制御の影響は考えなくてもよいと思われる。またアラン分散で評価した原子発振器としての性能としては、500 Hz以上ではNo.2の位相雑音が小さくなっている効果が現れて、全体にNo.2の方が、アラン分散が小さくなっており、短期安定度はNo.2がすぐれていることを示している。

6. 今後の課題

これまでに、標準周波数の絶対値を保持するために、TVカラーサブキャリアを用いて基準発振器の周波数の校正を行ったり、高安定水晶発振器の周波数の安定度の測定を行ってきた⁽⁶⁾が、その測定値には基準として用いた発振器の位相雑音の

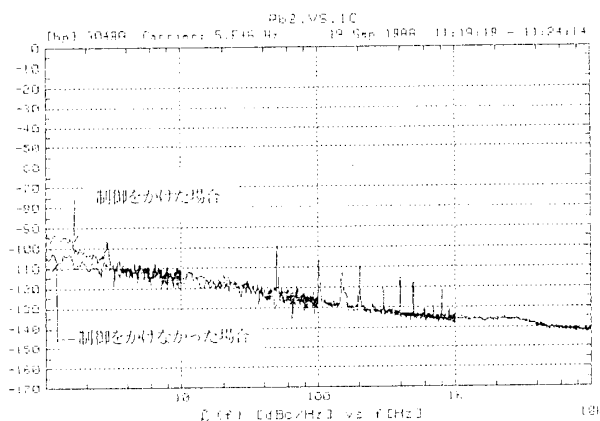


図 3-1 Rb原子発振器 No.1の位相雑音特性

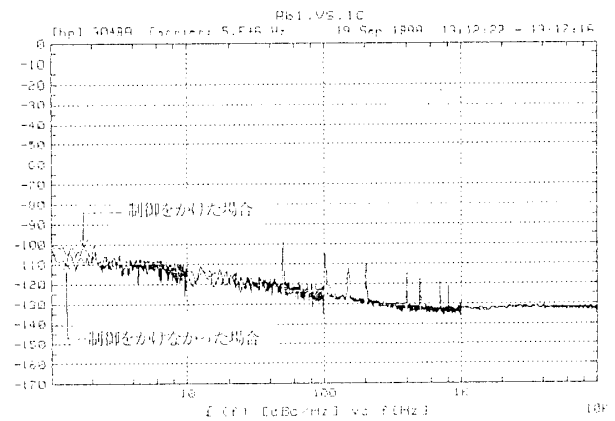


図 3-2 Rb原子発振器 No.2の位相雑音特性

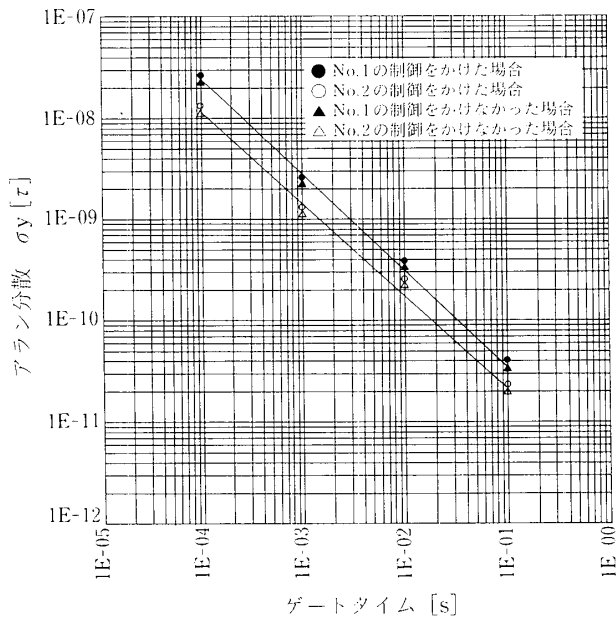


図 4 Rb 原子発振器のアラン分散の特性

外にシステム雑音の影響が入り込む。したがって今後これら高精度の測定に用いる位相比較器、信号分配器等のシステム雑音の評価を行い、校正値の信頼性を検討する。さらに半導体レーザーポンピングによる反射型 Cs 原子発振器⁽⁷⁾の周波数安定度に対する、その構成要素の各パラメータ（半導体レーザーの安定度、光強度、反射率、共鳴セルのガスの種類、圧力等）の影響について位相雑音を用いて評価、検討を加え、最終的に総合動作の検討を行う。

7. 結論

本研究では位相雑音測定システムを用いて 2 台

のルビジウム原子発振器の性能評価を行った。フーリエ周波数が 1~10 KHz の範囲で、2 台のもつ性能のわずかな違いをはっきりさせることができた。また 10 Hz 以下では制御をかけないときの方が位相雑音が小さくなったが、これは原子発振器に内蔵されている水晶発振器の経時変化を小さくするためにかけた制御が、フーリエ周波数の低域で位相雑音を大きくしてしまったものと思われる。

なお本研究で用いた位相雑音測定システムは昭和 62 年度工学部特別研究経費によって購入された。関係各位に深謝する。

参考文献

- 1) 岡野, 「C/N 測定の JIS 規格制定の経緯」精密周波数処理回路委員会 資料 No.11-4 (昭 62-5)
- 2) HP3048A 位相雑音測定システムトレーニングテキスト, 横河ヒューレットパッカード株式会社
- 3) HP 3048 A Phase Noise Measurement System Operating Manual, HEWLETT-PACKARD
- 4) 電気学会技術報告「周波数安定度とその測定」第 41 号 (昭 51-2)
- 5) 作田, 小沢, 関根, 須山「位相雑音測定系のシステム雑音に関する検討」精密周波数処理回路調査専門委員会 資料 No.8-2 (昭 62-1)
- 6) 松田, 松本, 蠟山, 「カラーサブキャリアによる水晶発振器の周波数制御」東京工芸大学紀要, Vol.6, No.1, 59 (1983)
- 7) 松田, 奥田, 「反射型構造を持つガスセル型 Cs 二重共鳴信号の解析」電気学会論文誌 C 分冊, 108 巻, 9 号 (昭 63-9)