

## レーザー周波数安定度の実時間測定装置の試作

非会員 椎尾 一郎<sup>†</sup> 正員 大津 元一<sup>†</sup> 正員 田幸 敏治<sup>†</sup>

## Real-Time Processing System of the Measurement of Laser Frequency Stability

Itiro SHIO<sup>†</sup>, Nonmember, Motoichi OHTSU<sup>†</sup> andToshiharu TAKO<sup>†</sup>, Regular Members

あらまし レーザの周波数安定度を実時間で測定する目的で、マイクロプロセッサを用いたアラン分散実時間測定装置を製作した。アラン分散は周波数安定度を表す一つの指標である。この装置はマイクロプロセッサにより測定空き時間のない周波数カウンタとアラン分散処理系を構成し、実時間でアラン分散を計算する。この装置の特徴は、① 実時間である、② 測定空き時間がないので正しいアラン分散の値を知ることができる、③ 2系統の信号源のアラン分散を同時に測定できる、などである。試作した装置は、周波数変調された正弦波発振器からの信号を用いた試験の結果、正常な動作が確認された。更に従来の測定系と並列に使用したところ、結果が一致したので、レーザー周波数安定度測定に用いることができた。

## 1. ま え が き

各種の気体レーザーの周波数安定化が行われ<sup>(1),(2)</sup>、その安定度も向上して分光実験などにも用いられるようになった<sup>(3)</sup>。その周波数安定度測定には従来オフラインのミニコンピュータや、実時間のコンピューティングカウンタHP 5390Aがよく用いられていた。しかしこれらは測定系が複雑であり高価であった。

一方筆者らは、高分解能レーザー分光用の周波数安定化レーザー、すなわち3.51μm H<sub>2</sub>CO安定化He-Xeレーザーの開発を行ってきた<sup>(4),(5)</sup>。このレーザーを分光用光源として用いる場合、分光測定中に周波数安定度を実時間で測定する必要がある。特に周波数が安定で且つ可変の、周波数オフセットロック He-Xe レーザシステム<sup>(5)</sup>を光源として用いる場合、複数のHe-Xe レーザの周波数安定度を同時に実時間で測定する必要がある。

そこで筆者らは、安価で、実時間、2チャンネル同時測定可能なレーザー周波数安定度測定装置を開発したので報告する。

<sup>†</sup>東京工業大学精密工学研究所、横浜市

Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, Yokohama-shi, 227 Japan

論文番号：昭 56-137[C-30]

## 2. 周波数安定度の評価方法

周波数安定度を表すパラメータとしてはアラン分散 $\sigma^2$ の平方根が用いられる<sup>(6)~(8)</sup>。これは次のように定義される。

図1に示すように、まず信号源の周波数を積分時間 $\tau$ で平均し、平均値 $\bar{f}_k$ を得る。連続する2個の平均周波数値 $f_1$ と $f_2$ についての標本標準偏差の2乗は、

$$\frac{1}{2-1} \sum_{i=1}^2 \left( \frac{\bar{f}_1 + \bar{f}_2}{2} - \bar{f}_i \right)^2 = \frac{(\bar{f}_1 - \bar{f}_2)^2}{2} \quad (1)$$

となるが、アラン分散はこれを $n$ 個の平均値 $\bar{f}_k$ に対して計算し、それを平均したもので、

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(\bar{f}_{k+1} - \bar{f}_k)^2}{2} / \bar{f}^2 \quad (2)$$

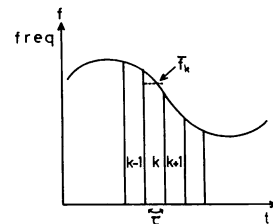


図1 信号源の周波数変化

Fig.1-Frequency change of the source signal.

で表される。但し、 $\bar{f}$  は信号源の公称周波数である。一般に周波数安定度は式(2)の平方根が用いられる。アラン分散は式(2)に示すように、平均された周波数データ数  $n$  と積分時間  $\tau$  の二つの変数の関数である。更に定義として測定の空き時間、すなわち図1で  $\bar{f}_k$  と  $\bar{f}_{k+1}$  の積分領域の境界部分の時間がゼロであることが要求されている。

### 3. レーザ周波数安定度の測定

図2は2台のレーザを用いてレーザの周波数安定度を測定する実験系を示している<sup>(5)</sup>。

2台のレーザの間のビート周波数が光検出器を用いて得られる。このビート周波数の揺らぎがレーザの相対的な安定度になるので、これを周波数カウンタで計数し、何らかの方法でアラン分散を計算すれば安定度が分かる。筆者らは従来、積分時間  $\tau$  の長いアラン分散には市販の周波数カウンタを用い、 $\tau$  が1 s未滿のものに対しては周波数-電圧変換器を用いていた。というのは、市販の周波数カウンタは表示とリセットに時間がかかり<sup>†</sup>、ゲート時間1 s未滿では測定の空き時間が大きくなり真のアラン分散が得られないおそれがあるためである。しかしながら、周波数-電圧変換器は精度の点で  $\tau$  の長い領域が測定できなくて<sup>††</sup>、結局、 $0.1 \text{ s} < \tau < 1 \text{ s}$  の範囲では信頼できるアラン分積が得られなかった。このようにして得た周波数データは従来紙テープ又はアナログデータレコーダに記録され、オフラインのミニコンピュータ (PDP-11) によりアラン分散処理されていた。このため測定系が複雑であり、

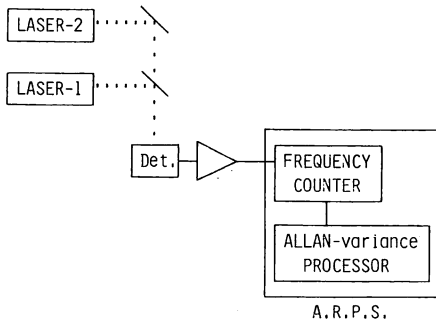


図2 周波数安定度の測定系  
Fig.2 - The measurement system of the laser frequency stability.

† エレクトロニクスカウンタ VP4551A の場合 50ms 以上。  
†† 筆者らの 3.51  $\mu\text{m}$  He-Xe レーザの場合、 $\tau = 10^{-1} \text{ s}$  で  $\sigma \sim 10^{-11}$  になる。

実時間でないので不便であった。

そこで積分時間  $\tau$  の広い範囲にわたって実時間でアラン分散を測定するために、マイクロプロセッサを用いて図2の周波数カウンタとアラン分散処理系を一つにまとめたアラン分散実時間測定装置 (Allan-variance Realtime Processing Systemの頭文字をとって以下 ARPS と呼ぶ) を製作した。

### 4. ARPSのハードウェア

図3にARPSのハードウェア構成<sup>(9)</sup>を示す。

MPU (Micro processing unit) には 6802 を用いた。浮動小数点演算を含む全プログラムは、PROM (Programmable read only memory) に固定した。3K Byte の RWM (Read write memory) は大半が周波数データを蓄えるために使用されている。プリンタは20けた感熱式である。キーボードはテンキーと五つの命令キーから成り、プリンタ出力とキーボードにより対話式でパラメータを設定でき、結果はこのプリンタに印字される。プリンタ、キーボードそして周波数カウンタのデータの入出力を行うためにMPUの周辺LSIの一つであるPIA (Peripheral interface adapter) を使用している。PIAは8 bit 入出力ポートを2系統と、割込やハンドシェイクの管理のための入出力を4本備えている。ここではキーボードのスキャンなどのデータの入出力、プリンタとのオートマチックハンドシェイク、周波数カウンタからの割込管理を行わせている。なお、周波数カウンタのカウント値のデータは、ラッチからアドレスバスによって選択されるマルチプレクサを通して直接データバスに取り込んでいる。

周波数カウンタは2系統の2進カウンタとラッチで

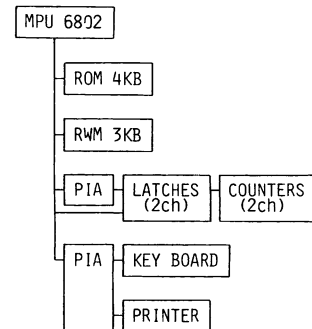


図3 ARPSのブロック図  
Fig.3-The block diagram of the ARPS.

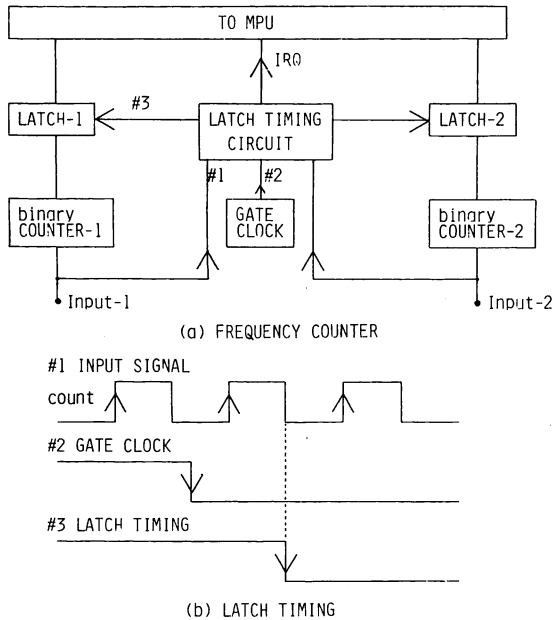


図4 周波数カウンタ部  
Fig.4 - The frequency counter.

構成されている。それを図4(a)に示す。この2進カウンタはリセットを行わないので、常にオーバフローしつづけている。設定されたゲート時間が経過するとそのときのカウント値がラッチに送られる。カウント値は入力信号の立上りによって更新されるが、このときカウンタが正しい値に安定するまで数十ns 必要である。そこで不定の状態のカウント値をラッチに送らないために、D-フリップフロップを利用してゲートクロックを入力信号の立下りまで遅らせてラッチをかけている。この様子を図4(b)に示す。

カウント値がラッチされると同時にPIAの割込入力を通してMPUのIRQ(Interrupt request)入力が立下りMPUに計数の終わったことが伝えられる。このときPIAに割込要求の入った入力ポートが記憶されているので、割込処理プログラム中でそれを調べれば2系統のカウンタのいずれがラッチされたのか知ることができる。周波数値は一つ前のゲート時間で計数された値との差と、ゲート時間からソフトウェアにより計算される。カウンタは2進24けたなので10進に換算すると約7けたの精度がある。

以上のようにカウンタがリセットされることなく累積されるので、空き時間を生ずることなく周波数を測定できる。

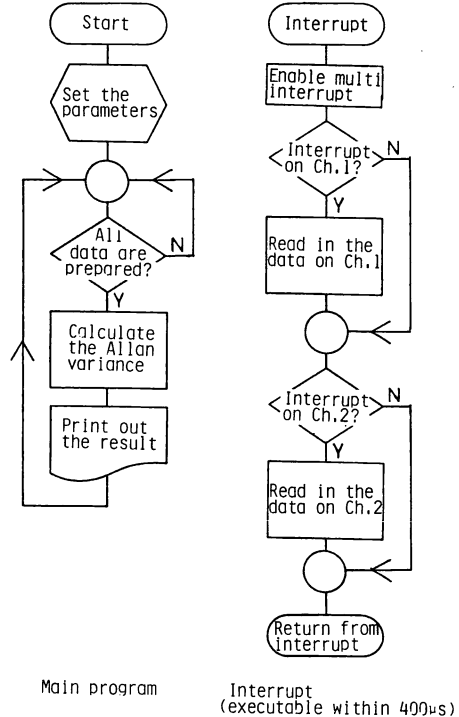


図5 アラン分散の計算プログラムのフローチャート  
Fig.5 - The flowchart of the program.

### 5. ARPSのソフトウェア

図5にプログラムのフローチャートを示す。主プログラムでは最初に対話式にパラメータを設定する。このパラメータは周波数カウンタ2系統の各々のデータ数 $n$ 、積分時間 $\tau$ 、規格化の定数である。この後、主プログラムは指定のデータ数のデータが採取されるまでループの中に入っている。そしていずれかの周波数カウンタからのデータがそろそろ、そのカウンタからのデータ採取を中止してアラン分散の計算を行い結果を印字する。アラン分散の計算にはデータ数100個の場合約0.7sかかる。

一方、周波数カウンタのゲート時間ごとに割込が発生し、プロセッサは主プログラムでのレジスタを退避して割込処理プログラムを行う。ここでは2系統の周波数カウンタのいずれの割込であるかを判断してデータを取り込む。割込処理プログラムを実行中にもう一方の系統の周波数カウンタから割込要求が入る場合がある。この場合に対処できるように2重割込が可能になっている。割込処理プログラム実行中に2重に割込要

求が入ると、プロセッサはレジスタを退避して再び割込処理プログラムを実行するのである。

割込処理プログラムでは、周波数カウンタのラッチからデータを採取し前回の割込時の値との差を計算し、設定されている $\tau$ に達しない間はデータを累計し主プログラムに戻る。このとき演算は4 Byte の整数形で行われ、浮動小数点演算を使用していないので高速である。そして $\tau$ 時間のデータが累積された場合には結果を浮動小数点表示に変換してメモリに格納する。このように割込処理プログラムでは $\tau$ 時間ごとの累積値をメモリに格納する仕事だけを行う。このためサンプル数だけのデータを蓄えるメモリが必要になるが、割込処理プログラムを速く終了することができる。この割込処理プログラムは、2系統のカウンタが同時に割込要求し最大の処理時間を要する場合でも約400 $\mu$ s以下で終了する。割込要求は周波数カウンタの最小ゲート時間の1 ms のときに最もひん繁に出されるが、この場合でもプロセッサは残りの600 $\mu$ s以上の時間を使って主プログラムを実行することができる。このような主プログラムと割込処理プログラムの2層の構造により、ARPSは2系統のアラン分散を同時に処理できる。

主プログラムでのアラン分散の計算では浮動小数点演算が使用されている。浮動小数点表示は実数 $x$ を

$$x = \left( \frac{a_1}{N} + \frac{a_2}{N^2} + \dots + \frac{a_m}{N^m} \right) \times N^\alpha \quad (3)$$

の形で表現するもので、 $a_1, a_2, \dots$ が仮数、 $\alpha$ が指数と呼ばれる。 $N$ が大きいと表現できる数の範囲は大きくなるが、けた落ちが起きやすくなる<sup>10)</sup>。ここでは $N=2$ とした。ARPSで採用した浮動小数点表示のデータ形式を図6に示す<sup>11)</sup>。

仮数部3 Byteとその符号が1 bit, 指数部7 bitの合計4 Byteを用いて一つの数値を表している。仮数は絶対値表示として1 Byte目のMSBに符号ビットがある。指数は2進の1000000を加えた7 bitで表現した。この表示で表現できる数 $x$ の範囲は約 $10^{-19} < |x| < 10^{+19}$ で、精度は10進表示で約7けたである。

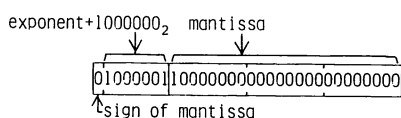


図6 浮動小数点表示のデータ形式(+1.の例)  
Fig.6 - The data type of floating-point data (the case of +1. ).

アラン分散計算に用いる浮動小数点演算は4則演算, 2進10進相互変換, 平方根などであるが, 実時間処理に用いるため, プログラム自体は冗長でも実行速度の速いことを目標として作った。その結果実行速度は乗算が2.6ms以下, 加算が350 $\mu$ s程度, 平方根が16.6ms以下となった。このため100個のデータ数のアラン分散の計算を1s未満で処理するので, 実時間処理を行うことができた。

### 6. 動作試験

ARPSは以下の方法で動作試験を行った。図7は500kHzで発振している電圧制御発振器に8.6Hzの正弦波の制御信号を加え,  $\pm 46$  kHzの周波数変調のかかった信号を作り, この周波数変動のアラン分散の平方根の値を測定したものである。

一方, この場合のアラン分散の平方根の値は式(2)に従って簡単な計算により

$$\sigma(\tau) = \frac{92}{500} \times \frac{\sin^2(\omega\tau/2)}{\omega\tau} \quad (4)$$

となる。但し, この場合 $\omega=2\pi \times 8.6$  rad/sである。又, この試験信号では $\omega\tau=m\pi$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ )の場合アラン分散が測定開始時刻だけの関数になり, サンプル数 $n$ を増しても収束しない。式(4)はこの場合, 何回かのアラン分散測定の平均値を与える。このため試験では $\omega\tau=m\pi$ にならないように $\tau$ を設定した。図7によると, ARPSによって測定した結果と, 式(4)の計算結果は良く一致しているのので, ARPSは正常に動作していることが確認された。

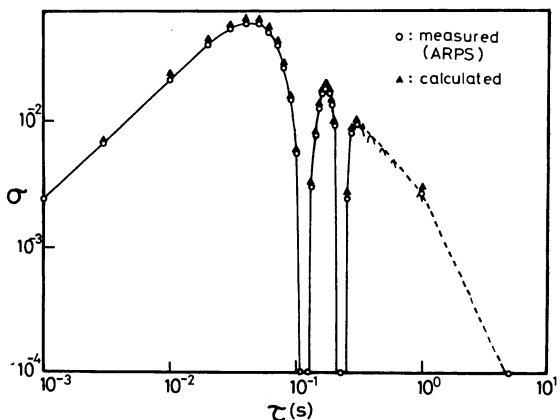


図7 ARPSの動作試験の結果  
Fig.7 - The result of the operation test of the ARPS.

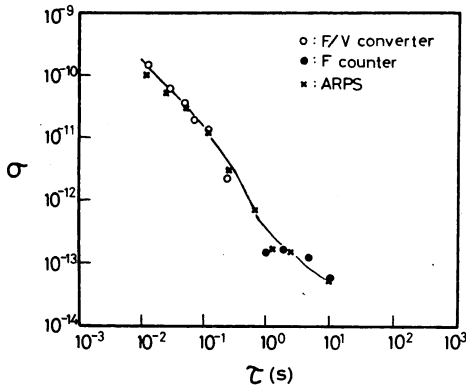


図8 3.51 $\mu$ m He-Xe レーザの周波数安定度の測定結果

Fig.8 - The results of the frequency stability of He-Xe lasers at 3.51 $\mu$ m.

図8はARPSを今までの測定系と同時に並列に用いて実際に3.51 He-Xe レーザの周波数変動のアラン分散の平方根を測定し、両者の結果を比較したものである。

実験系は図2に示した配置になっていて、2台のレーザーはビート周波数が2 MHz になるようにオフセットロックがなされている3.51 $\mu$ m He-Xe レーザである<sup>6)</sup>。このビート信号をTTLレベルに変換し、10分の1に分周してそのアラン分散を測定した。測定は従来の測定系、すなわち周波数-電圧変換器と市販の周波数カウンタを用いてミニコンピュータで処理し、並行してARPSによって処理を行った。そしてこれらと比較した。従来の方法は前述のように0.1s <math>\tau < 1s</math>の領域の測定値が得られなかった。これに対してARPSは $\tau$ の広い範囲、すなわち1ms  $\leq \tau < 2^{32} \times f^{-1}$  (s)の範囲で測定可能である。ここで $f$ は入力信号の周波数(Hz)である。 $\tau$ の上限は周波数値を積分するときに4 Byteの整数形で計算されることによる。図8の結果、従来の系と測定値が一致したので、ARPSがレーザー周波数安定度の長時間測定に使用可能であることが確認された。

### 7. むすび

本研究で試作したARPSの特徴は、

- (i) 実時間測定ができる。
- (ii) 2系統のアラン分散を同時に処理する。
- (iii) 1ms  $\leq \tau < 2^{32} \times f^{-1}$ (s)の広い範囲の $\tau$ について測定できる。
- (iv) 従来の周波数カウンタと異なり、測定の空き時

間がないので、アラン分散の定義に反さない。

- (v) 周波数カウンタを用いているため、周波数-電圧変換器に比べて高精度である。周波数カウンタは2進24けたであり、 $\tau$ 時間累積するためのメモリは2進32けたである。
- (vi) 単機能の専用機としたため操作性が良く安価である。アラン分散を測定する市販の測定器にHP 5390Aがあるが、これが多機能であるため高価なのに対しARPSは安価であり、(iii)及び(iv)の項目の特長がある。

謝辞 本研究の一部は文部省科学研究費特定研究の補助によりまかなわれた。ARPSの製作に当って協力して頂いた波多腰栄一技官に深く感謝する。

### 文 献

- (1) Barger, R.L. and Hall, J.L.: "Pressure shift and broadening of methane line at 3.39 $\mu$  studied by laser saturated molecular absorption", Phys. Rev. Lett., 22, pp.4-8(1969).
- (2) Hanes, G.R. and Baird, K.M.: "Preliminary wavelength, I<sub>2</sub> controlled He-Ne laser at 633 nm", Metrologia, 5, pp.32-33(1969).
- (3) Ohtsu, M. and Tako, T.: "Frequency stability of an H<sub>2</sub>CO-stabilized He-Xe laser in an axial magnetic field", Jpn. J. Appl. Phys., 17, pp.2169-2170(1978).
- (4) Ohtsu, M., Koyama, R. and Tako, T.: "Improvements in the long-term frequency stability of the He-Xe laser at 3.51 $\mu$ m", Jpn. J. Appl. Phys., 18, pp.1621-1622(1979).
- (5) Ohtsu, M., Koyama, R., Kusunowo, A. and Tako, T.: "Development of a frequency-offset-locked He-Xe laser at 3.51 $\mu$ m", Jpn. J. Appl. Phys., 18, pp.1619-1620(1979).
- (6) Allan, D.W.: "Statistics of atomic frequency standards", Proc. IEEE, 54, pp.221-230(1966).
- (7) Barnes, J.A., Chi, A.R., Cutler, L.S., Healey, D. J., Leeson, D.B., McGunigal, T.E., Mullen, Jr., J.A., Smith, W.L., Sydnor, R.L., Vessot, R.F.C. and Winkler, G.M.R.: "Characterization of Frequency Stability", NBS Tech. Note, No.394(1970).
- (8) 周波数精密測定回路専門委員会: "周波数安定度とその測定", 電気学会技術報告(II部), 41, p.8(昭51).
- (9) 日立製作所: "日立マイクロコンピュータシステムデバイスデータブック"(昭53).
- (10) 六田嘉明: "浮動小数点プログラムの作り方", インターフェース, 25, pp.33-64(昭54).
- (11) 井波俊夫: "8080A用浮動小数点演算プログラム", インターフェース, 25, pp.65-101(昭54).

(昭和55年8月11日受付, 10月31日再受付)