

デジタル信号処理技術によるヨウ素安定化He-Ne レーザの周波数制御

平野 育*, 石川 純**

(平成19年3月23日受理)

Frequency control of the Iodine stabilized He-Ne laser by digital signal processing technique.

Iku Hirano, Jun Ishikawa

Abstract

A frequency of digitally controlled iodine stabilized He-Ne laser locked to a hyperfine component in $^{127}\text{I}_2$ was measured using NMIJ's reference iodine stabilized He-Ne laser. This laser is operated under the conditions of the mise en pratique and its frequency with respect to the CIPM recommended value is known from international intercomparisons. The adoption of the higher sampling rate for digitally controlled system of an iodine stabilized He-Ne laser has accomplished the frequency deviation of the test laser from the reference iodine stabilized He-Ne laser within ± 5 kHz (relative accuracy of 1×10^{-11}) limited only by the reproducibility of the iodine stabilized He-Ne laser itself.

1. はじめに

高度情報化の勢いは、集積回路の微細化、高速化、高機能化、低コスト化を導き、今までアナログ回路で製作していた回路がDSP (Digital Signal Processor) やFPGA(Field Programmable Gate Array)等で置き換えられて設計されることが多くなってきている。DSPを使用した回路であれば、回路調整がソフトウェアによる数値入力だけで可能であり、また、過去のデータを蓄積して数値演算処理して制御に利用できるため、高度な制御が実現できる利点がある。また、大量のデータを高速に処理できるだけでなく処理結果の再利用や情報伝達等が容易にできる利点もある。その一方で回路設計が複雑になり、開発環境やハードウェアが早いサイクルでバージョンアップされるため、古いプログラムがすぐに使い物にならなくなり、一般向けの解説書もわずかであるという欠点がある。機器の構造はできるだけ単純にして、実績と信頼のある部品を使用したほうが機器の信頼性が向上し、保守も容易となる。しかし、高度情報化の流れの中、電子部品、ソフトウェアは次々と新しく高性能なものが現

れ続けており、古い製品は消滅しているため、技術者には常に新しい知識の習得と技能の研鑽が必要とされているのも事実である。制御装置の小型化高機能化は時代の流れであり、このためには、高密度実装半導体の使用に代表される個々の部品の小型化高密度化や個数の削減と併せて、部品自体の配置の高密度化も重要である。また、部品を配置するプリント基板も多層化、配線の狭ピッチ狭幅化といった観点から考えていかなければならない。また、多くの能動素子を高密度に実装すると熱が多く発生するので、消費電力を下げるため低電圧電源で回路を駆動することも必要になってくる。連綿たる性能試験を必要とはするが、制御装置を組み込みシステムとして小型化することにより信頼性や実用性の向上にもつながる。このような背景から、メートルの定義¹⁾を実現するために国際度量衡委員会の勧告として出された安定化レーザ²⁾の中で最もよく利用されているヨウ素安定化He-Neレーザの制御系にデジタル信号処理技術を適応することを試みた。制御系の概要と周波数測定結果については既に報告を行ったが³⁾、制御装置の性能、適用したフィルタの周波数特性、ヨウ素安定化He-Neレーザの周波数測定系について図を加えより詳細に記述し、技術資料として報告する。

* 計測標準研究部門 時間周波数科

**計測標準研究部門 時間周波数科 (現デジタルものづくり研究センター)

2. 信号処理汎用ボードの開発

製作した信号処理ボードを図1に、またボードのブロック図を図2に示す。信号処理のボードの開発についてはヨウ素安定化He-Neレーザの制御以外にも使用できるように4チャンネル入力4チャンネル出力とした。DSPとしてアナログデバイス(ADI)のADSP-2100ファミリのADSP-2188Mを使用した。このファミリは、デジタル信号処理や高速数値演算アプリケーション用に最適化された基本構造を備えている⁴⁾。制御用プログラムはADIのVisual DSP++を使用してアセンブリ言語で製作した。ソースファイルはアセンブルされた後、プロジェクトの中に含まれるヘッダーファイル等とリンクされ実行形式のファイルが作成される。パーソナルコンピュータから実行形式のファイルをUSBでDSPボードに送りDSPボードが動作する。DSPボードはUSBのインターフェイスとしてML60851(沖電気)、ADSP-2188MのホストとしてH8/3048(ルネサス)を使用し、H8/3048のI/O制御を利用してファイルをADSP-2188Mへ送っている。AD変換器は分解能16-bitのAD7663(ADI)、DA変換器は同じく分解能16 bitのAD5544(ADI)を使用した。ここで、ボードの性能について述べる。ADSP2188Mは、Clock周波数75 MHz



図1 製作した信号処理ボード

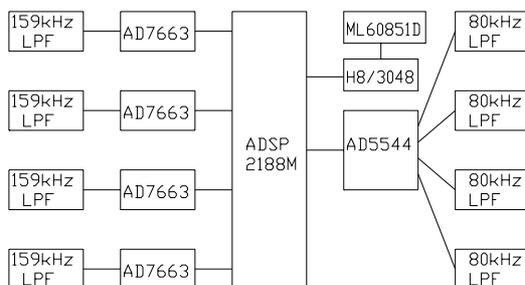


図2 ボードのブロック図

16 bitである。AD7663はフルスケール10 Vで使用した。分解能は16 bitなのでフルスケールに対する量子化誤差が0.000153となる。よって入力の分解能は1.53 mVとなる。サンプリング周波数は250 kSPSである。AD5544についても電圧分解能は同様である。AD5544はシリアル入力となっており、最高50 nsのクロックで動作する。ADSP 2188MとAD5544間はシリアル転送となっており、1CH入力2CH出力として動作させた制御プログラムはサンプリング周波数が118.8 kHzとなっている。シリアル転送が処理速度を制限しているが、一般の機械制御には十分対応できる性能を持つ。

3. 制御プログラムの開発

図3に制御系のブロック図を示す。変調信号 f とその3通倍波 $3f$ の発生、同期検波、移動平均フィルタ、積分、オフセット調整をソフトウェアにより行う。プログラムの基本動作はタイマ割り込みである。一定周期ごとにDSPに割り込みをかけて、その割り込みの間にデータの読み込み、信号処理、データの出力を行っている。変調信号とその3通倍波は、サンプリング点の振幅値を16bitの精度で計算したテーブル(表)をあらかじめ作っておき、始点と終点が接続されたリング状のメモリにデータを格納しデータを順次読み出すという方式で発生させた。たいへんシンプルな方式なので、近似式から振幅値を求める方法等に比べてサイクル数は最も少なくなり、また、振幅をあらかじめ計算しておくので理論値との誤差が最小になる⁵⁾。変調信号については、1周期について36点のsin波のテーブルを用意して、3通倍波については、12点のsin波テーブルを3回繰り返して用意している。変調信号のテーブルの値を移動させることによって、3通倍波による同期検波のスイッチ波形と変調による吸収線による光強度の変化の信号の位相を 10° 刻みで変化させることができ、最適な位相を得ることが可能である。変調周波数は国家標準として使用している特定標準器であるHe-Neレーザで3.3 kHzとしてあるので、これと同じ周波数となるように、DSPのサンプリング周波数を $3.3 \text{ kHz} \times 36 = 118.8 \text{ kHz}$ としている。サンプリング周波数は、DSPの2つのレジスタの値をアセンブリプログラムの中で記述することにより、設定することができる。DA変換器へ送るシリアルデータの長さは、チャンネル指定の2 bit と16 bitのデータを合わせた18 bit を9 bit づつ2回に分けて送っている。プロセッサが送信フレーム同期信号と受信フレーム同期信号を内部で生成し、各ワード毎に送信フレーム同期を行っている。シリアルポートを動作させる

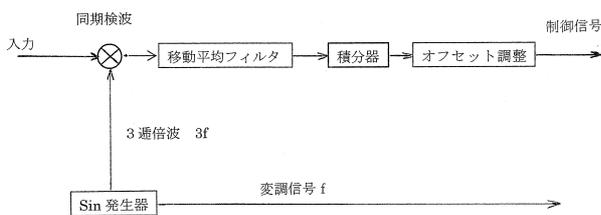


図3 制御系のブロック図

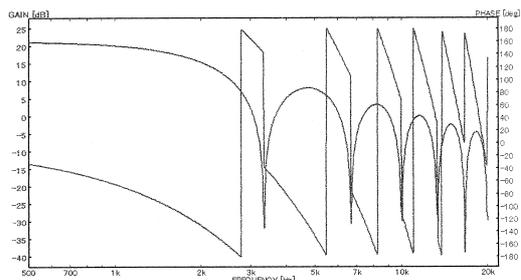


図4 移動平均フィルタのゲイン位相特性

ための、クロックはプロセッサ内部で発生させている。入力信号は3通倍波で同期検波された後、移動平均フィルタへ入る。移動平均フィルタは低域通過フィルタとしてよく知られているが、サンプリング周波数をサンプリングの個数で割った周波数ごとに深いデブが現れることを利用して優れたノッチフィルタとして利用することができる。よって、変調周波数(3.3 kHz)に変調周波数を発生させるためのデータ(36点)をかけた値をサンプリング周波数(118.8 kHz)とすれば、変調周波数と同期検波に使用した3通倍波を数学的には0として取り除くことができる。図4に実測した移動平均フィルタのゲイン位相特性を示す。このようにデータの記憶ができるデジタル信号処理の特徴を生かして、変調信号を効果的に取り除くことを行った。入力信号はその後、積分器を通り、オフセットを調節して制御信号として出力される。全体のシステムの概略を図5に示す。DSPボードからはヨウ素安定化He-Neレーザの共振器長を変化させる変調周波数と制御信号を発生させている。制御信号は増幅され共振器の長さを調節する piezo 素子に加えられる。ヨウ素安定化He-Neレーザからの出力信号をフォトダイオードで検出して、差動増幅器を通過させることにより吸収線による強度変化を誤差信号として捉え、制御ボードへ入力する。周波数を掃引するか、ロックするかはアナログスイッチで切り替えられる。図で右上のオペアンプについては周波数掃引時にはスイッチが閉じられ、周波数ロック時にはスイッチが開かれる。また、周波数ロック時にスイッチを閉じるとリセットがかかる。

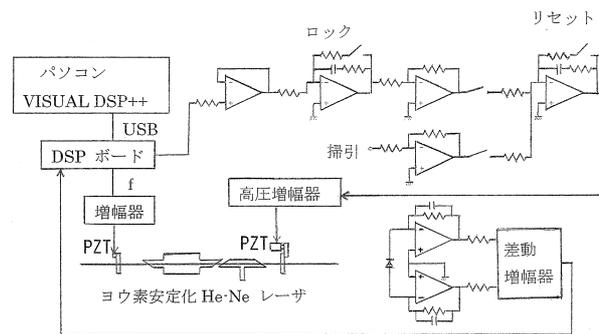


図5 全体のシステム

4. 周波数測定

試験用レーザと国家標準である特定標準器のレーザとの発振周波数の比較を行った。図6に測定系を示す。レーザの変調の深さが6 MHzピークトゥピークであるので、2つのレーザの周波数がヨウ素の同じ吸収線に安定化された時には、カウンタのゲートタイムが短い時の測定の不確かさが増加するため、2つのレーザの間に発振周波数が300 MHz高いオフセットレーザを介して周波数の比較を行っている⁶⁾。周波数測定の結果を図7に示す。横軸は吸収線を周波数の順番に配列したもので、正確な周波数は表していない。カウンタのゲートタイムは10秒である。試験用レーザの発振周波数の特定標準器レーザの発振周波数からの周波数差は各吸収線について±5kHz以内であり、これは国際度量衡委員会に記載されている発振周波数の不確かさの範囲⁷⁾に収まり、十分な周波数制御が実現されたことを示している。ここに現れた不確かさは、ヨウ素蒸気圧、ヨウ素蒸気温度、周波数変調の深さ、共振器内のレーザパワー等の設定の不確かさに起因している⁸⁾。また、周波数差が図7でd線からg線に行くにつれて系統的にずれているのは、周波数変調機構の機械的特性の差(高調波歪発生)の差であると考えられる。

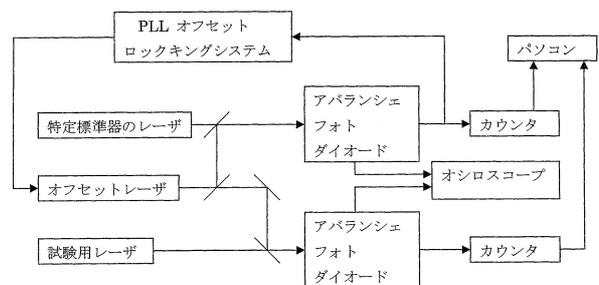


図6 発振周波数比較測定系

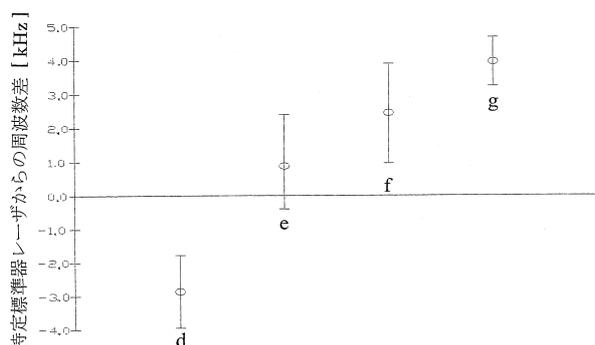


図7 各吸収線についての周波数比較

5. むすび

精密周波数制御回路の高機能化小型化へ向け、ソフトウェアによるデジタル制御系を構築し、ヨウ素安定化He-Neレーザーの変調信号の発生、同期検波、移動平均フィルタ、積分、オフセット調整に適用した。移動平均フィルタは過去のデータをリアルタイムで利用し、変調周波数とその逡倍波のところで鋭いノッチの特性を持つ。これはアナログ回路では実現できなかった機能である。また、ソフトウェアによりデジタル制御系が記述されているので、パラメータの設定が非常に容易となり、レーザーの特性を調べることが容易になった。さらに、ヨウ素安定化He-Neレーザーの発振周波数の精度を国際度量衡委員会の勧告に記載されている範囲に収め、制御系の性能も十分であることを示した。

6. 謝辞

本研究は、NEDOの委託費「計量器校正情報システムの研究開発(e-trace)」により実施された。また、制御ボードの設計、ADSP2188Mアセンブリ言語とUSBインターフェースの技術導入に関しては、岩尾宏昭氏(エヌエフ回路設計ブロック)、宮本政和氏(金沢工業大学)、椋澤亮一氏(エヌエフ回路設計ブロック)にお世話になった。関係者の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森永篤郎:21世紀の国際単位と標準,応用物理,74, 6, pp.718-725(2005-6)
- 2) “ Documents Concerning the New Definition of the Metre*”, Metrologia, Vol.19, No.4, pp.163-177 (1984)
- 3) 平野育, 石川純, 岩尾宏昭, 椋澤亮一, 宮本政和: ヨウ素安定化He-Neレーザーの制御系のデジタル化, 電気学会論文誌D, 126, 2, pp.208-209(2006-2)
- 4) <http://www.analog.com/>
- 5) 鈴木雅臣: DSPによる波形発生の信号処理, トランジスタ技術, vol.398, 11, pp.258-295 (1997-11)
- 6) J. Ishikawa: "Accurate frequency control of an internal-mirror He-Ne laser by means of a radiation-heating system", Appl. Opt., Vol.34, No.27, pp.6095-6098 (1995-9)
- 7) T. J. Quinn: "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards(2001)", Metrologia, Vol. 40, pp.103-133 (2003)
- 8) 石川 純: 633nmレーザー波長校正と不確かさ, 産総研計量標準報告, 4, 1, pp.71-77 (2005-7)