## テクニカルレポート Vol. 14-4

# 株式会社フォトンプローブ

報告者 平野雅夫、神田麻美、黒川翔、平野ゆかり 報告日 2014年6月21日

- **題名** 長時間測定をターゲットとしたリアルモード計測について
- 概要 ヘテロダイン処理系において、リアルモードでの測定技術の構築を行った。構築 対象は、信号処理装置が主である。シンセサイザを用いて理論どおりの動作を確 認し、1nm以下の分解能を確認した。そして、種々のパラメータの動作可能範囲 を得た。その装置により、標準光学系を用いて、空気中内および真空室内で計測 した。
- 結論 リアルモード測定できるアルゴリズム・プログラムおよび装置を構築した。
  理論どおりの結果を得た。リアルモード条件で光学実験を行った。
  5 分間の連続測定において、分解能は0.5nm以下を確認した。真空内測定で、
  ノイズが大幅に減少することが知れた。

### 報告内容

- 1. 長時間測定できるリアルモード設定のために
- 2. シンセサイザによるデータ測定・解析
- 3. 標準型光学系でのデータ測定・解析
- 4. 真空室内での標準型光学系でのデータ測定・解析
- 5. 考察·反省

### 報告詳細

1. 長時間測定できるリアルモード設定のために

長時間測定をターゲットにする際に、ヘテロダイン測定において、最大の問題のひとつは時間をかけ た測定である。なぜなら、時間軸の変動が大きな誤差要因になるからである。そこで、次の方法で対処す ることとした。

- 時間の基準は水晶発振機周波数とし、その周波数発振機の公称値からのずれ、およびその温度 依存性を調べて、測定状況にマッチさせる。
- ② 積算手段はそのままであるが、極めて大きな回数の足し算になるため、毎回の測定精度を可能な限り上げる。現在1データ32ビットの制約があるため、1nm以下の小数部のビット数を 増やす。小数部8ビット整数部24ビットをターゲットとする。
- ③ 出力時間間隔の間に、得られた1µsごとのデータを積算平均するデータ数を増やす。ランダムノイズ成分はこの積算平均で小さくなり、②で問題となるビット数問題を回避できる方向に働く。8192回(13ビットシフト発生)もしくは16384回(14ビットシフト発生)をターゲットとする。
- ④ 出力時間間隔をできるだけ短くする。時間間隔が短ければ、測定対象の速い変動を計測できる。

Photon Probe, Inc.

今回、分析装置を念頭としているため、0.1秒から0.2秒間隔を目標とする。ただし、時 間間隔が短いほど出力データ数が増え、特性評価のためのデータ処理能力に関してPC側から 制約を受ける。

これらの、条件を満足する、数式・データ処理・アルゴリズム・プログラムの構築作業を、2013年後 半より継続して行ってきた。繰り返しの修正とデータ測定により、リアルモード測定できる装置を構築し た。

(アルゴリズム・プログラムの詳細、電子回路などは弊社機密事項として本レポートでは掲載しない)

2. シンセサイザによるデータ測定・解析

信号処理装置が正常動作するか否かを確認するために、2チャンネルに信号(2.5MHz近傍)を 加え信号処理装置からの出力を評価した。図1に実験構成を示す。



図1 測定系

PC側より信号処理装置に命令を送り、その命令に基づき、信号処理装置は動作し、アルゴリズムに基づ いて、データをPCに送る。このルーチンを一定の時間間隔で行う。信号処理に要する時間は1μ s 以内 で行えるのだが、データ転送に時間がかかり、そのデータをPC画面上に表示する際に時間がかかる。こ の2つの作業時間がデータ信号出力の時間間隔を決める。

繰り返し試行錯誤を行い、問題点を解決して、次のパラメータにつき検討を行った。

- ① 信号電圧(Vpp値であらわし、光電変換装置の制約を受ける)
- ② 平均点数(計算途上のビット数との関係で制約を受ける)
- ③ ビット配分(平均点数、出力時間間隔との関係で制約を受ける)
- ④ 出力時間間隔(PC側の処理速度、インターフェースボードの処理速度の制約を受ける)
- ⑤ 2 c h 間の周波数差(シンセサイザの能力、処理装置の能力より限界あり)

```
Photon Probe, Inc.
```

2 Technical Report

⑥ 温度・大気圧(今回は水晶発信機の温度特性のみが問題になる)

⑦ プログラム中のCLK値(以前の報告に基づき119.99176MHzとする)

リアルモードにおいて、2 c h 間に周波数差を一定に与え続ければ、変位量出力は時間に対して線形に変化する。その線形性は理論により、(反射光を測定する前提において)

変位量=測定波長/2\*周波数差\*測定時間

である。測定波長として、632.826188 [nm]、周波数差として、1 [Hz]、とすれば 変位量=316.413094\*測定時間(秒) [nm] であらわされる。

そこで、出力時間間隔を0.2秒とし、1500点の連続計測(5分間)を繰り返し行った。

以下条件を変えた際の1秒間の変位量平均値を示す。

変更するパラメータとして、信号処理回路への信号電圧(ch1とch2)、及び周波数差のみとした。 他の条件は同じとした。

番号	c h 1 の入力電圧	c h 2の入力電圧	周波数差	1秒間の変位量計測値[nm]
1	0. 48Vpp	0. 48Vpp	+ 1	$-316.4405\pm0.025$
2	0. 48Vpp	0. 48Vpp	- 1	$3\ 1\ 6\ .\ 4\ 5\ 6\ 0\ \pm\ 0\ .\ 0\ 2\ 5$
3	0. 36Vpp	О. 36Vрр	+ 1	$-316.4595\pm0.025$
4	0. 36Vpp	О. 36Vрр	- 1	$3 1 6. 4 6 1 0 \pm 0. 0 2 5$
5	0. 24Vpp	0. 24Vpp	+ 1	$-316.4490\pm0.025$
6	0. 24Vpp	0. 24Vpp	-1	$3 1 6. 4 3 2 0 \pm 0. 0 2 5$

表1 信号処理回路への入力信号電圧及び周波数差を変えた場合の1秒間の変位量計測値(データを 直線表現した場合の傾き値)



図2 5分間のリアルモード測定結果の例(入力信号電圧 0.36Vpp,周波数差Hz)

3

Photon Probe, Inc.

図2に、測定条件として、入力信号電圧0.36Vpp、周波数差1Hz時の変位量変動の様子を示 す。300秒で約100ミクロンの変動が計測された。図3に直線表現した場合の直線式からの計測 値のずれのデータを示す。構造があるように見えるが、現時点では、その構造に触れず、±0.25 nm以内に収まっていることだけを確認する。



図3 図2データの変位量変化を直線表示した際の、直線からのずれ量の時間変化

直線近似からのずれは極めて小さく、ばらつきの標準偏差=0.073 [nm]、である。 以下の点より、信号処理回路はリアルモード測定において、理論どおりに測定できていることを知る。ま た、5分間の連続計測も可能であることを確認できた。そして、分解能が1nm以下であることを確認で きた。

- ① 変位量の絶対値が100ミクロン近くまで変動するにもかかわらず、直線的変化は保たれている。
- ② 直線近似からのずれは、5分間を通して、0.5nm以下である。

③ 直線の傾き(m)は理論値(M=316.413094)と比較して、

 $\delta \mathbf{m} \equiv | (\mathbf{m} - \mathbf{M}) / \mathbf{M} | \leq 0. \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 5$ 

と極めて小さい。

- ④ 繰り返し測定におけるばらつきは、δm≤0.00015を満足した。
- ⑤ 周波数差を正負入れ替えても、上記結果は満足された。
- ⑥ ch1とch2に対する信号を入れ替えても、上記結果は満足された。
- ⑦ 信号電圧を0.48Vpp以上、1.1Vpp以下にしても上記結果は満足された。ただし、1.1 Vpp以上、0.24Vpp以下においては、測定値に乱れが発生し、上記関係は満足しなくなった。
- ⑧ 出力時間間隔を0.1秒、0.5秒、1秒に替えても、上記結果は満足された。

Photon Probe, Inc.

4 Technical Report

⑨ ビット配分を、整数部28ビット、小数部4ビットとした計測においても、上記関係は満足した。しかし、整数部32ビットとしたビット配分での計測は満足しなくなった。さらに整数部20ビット、小数部12ビットとするビット配分での計測においては、変位量絶対値のオーバーフローがあるため、データ修正を必要とした。(データ修正後の測定値に関しては、上記結果を満足した。

⑩ 平均点数を、4096点、8192点、32768点としても、上記結果は満足された。

3. 標準型光学系でのデータ測定・解析

光学系は、図1のシンセサイザの代わりに導入される。標準型光学系の詳細については、テクニカルレポ ートVol. 13-8を参照のこと。

光学系では様々な要因で変位量が変動することが予測される。

その中で、寄与が大きいのは次の4点であろう。

① 信号処理回路の水晶発信機の公称値(120MHz)と実測値のずれ

② 周波数シフタのビート周波数の公称値(2.5MHz)と実測値のずれ

③ 環境による光学ベースの伸縮

④ 環境による空間伝播長の伸縮

これらの原因は、結果を左右することもあるので、一つ一つ修正を要する問題である。(特に①及び②に関 しては詳細な実験が必要となることと、水晶発信機の発振周波数の温度特性が問題になるので、正確さに 問題も生まれる恐れがある。後の検討課題である)

ここでは、これらの要因があって、変位量が時間と共に変動することを認めたうえで、測定を行った。その1例を図4に示す。(この4つの変位量変動要因の発生度合いについては、ここでは検討しない。ただし、 その寄与の存在のみを検討する。)



図4 標準型光学系を用いた場合のリアルモード測定例 2500点(8分20秒)間連続的に変動しており、ほぼ直線的変動を示している。

 $\mathbf{5}$ 

繰り返しの測定においても、同様な結果(10分程度の0.2秒間隔での連続計測)を得た。

Photon Probe, Inc.

これらの結果に対して、次の特性を示した。

- <1> 光学調整後すぐの測定(測定系ブース内に人が立ち入り測定系に直接触れて調整するため、体 温により測定系の温度が上がった)と、しばらくの値の測定(体温による上昇分が冷却され、 空調の温度約17度に近づいている)では、この直線的変動に差が生じた。これより、③お よび④の寄与が推測できる。
- <2> 昼夜の測定時刻で傾きが変化した。空調の動作、環境温度が大きく変わっている。これより、 ③および④の寄与が推測できる。
- <3> 図4に示すように、多くのデータは、時間と共に変位量が(傾きを問わないとして)減少した。 これより、①及び②の寄与が推測できる。
- リアルモードの連続計測を確認し、①から④の影響を推測できる。

次に、分解能の推測のため、2つの方法でデータ処理を施した。

- <1> 0点から500点までの変動(直線的変動が予測される領域)において、直線近似を行い、その 直線からのずれを求めた。(全域では直線性が認められないが、部分に分けた領域では直線関係が 認められる。これは、かなりゆっくりな変動(500点は1分40秒)する要因により、全域を通し ての直線性が認められないことによる。2分以上を要しての変動は、機械的振動など比較的周波数 の高いノイズが原因ではないことが知れる)
- <2> データ間差の時間変動を求めた。0.2 秒ごとに、様々な要因に基づく変動が予想されるが、理論的 変動以外はすべてノイズと認識する。このノイズが分解能を左右する。ここでは、理論値変動以 外をすべてノイズと処理する。

(直線的変動は、上記①と②の条件においては必然的であり、③と④の条件においては、温度が一定の割合 で推移すれば、機械材・空気の膨張が温度に比例するため、直線的変動を発生させる。ここでは、どの条 件が働いたかは不明)



図5 直線的変動近似での直線からのずれ(図4のデータの1点から500点まで)



図6 隣り合うデータ間の差の時間変動 (図4に示すデータに対して)分布の標準偏差=0.148 [nm]

<1>の解析

図5のデータは、ほとんど測定データが直線的に変動していることを示している。これは①から④の寄与 があった場合に予想される結果と同じである。図5のデータのばらつきより、計測時の分解能が、0.5 nm、程度であることを示している。

他の500点ごとの領域でも直線近似は成り立つ。そして、ばらつきも同程度であり、計測時の分解能が 0.5nmであることも同様に示し得た。

<2>の解析

分解能を測定間のばらつきでも判断できる。つまり、0.2秒ごとの変動は、上記①から④の影響による 以外は、原因が判明しないノイズに基づくと判断できる。そしてこのノイズが分解能を左右する。そこで、 前者の①から④の寄与をゼロと判断して、隣り合うデータ間のばらつきを求める。図6に、図4のデータ の隣り合うデータ間の差の時間変動を示す。2500点ほとんどすべての点が、±0.5nm、の範囲内に ある。解析の結果、この分布の標準偏差は、0.148であった。

これより、分解能は、悪く見積もっても、0.5nm、あることがわかる。

4. 真空室内での標準光学系のデータ測定・解析

大気中と真空中では、空気の存在が異なる。空気の屈折率は1ではなく、わずかに大きい。これが機械的 距離と光路長の差を生み出す。どの程度なのか、理論的に見積もる。

機械的距離としての光路長差=0.412m、が問題になる。

標準状態では空気の屈折率は、1.000276505、真空中での屈折率は、1である。

しかしながら、光路長がわずかにずれても、測定結果に屈折率の違いそのものは現れない。問題は、その 温度依存性である。

Photon Probe, Inc.

7 Technical Report

(大気中での、20℃から21℃へ変動した場合の光路長の変動量)

屈折率(20℃)=1.000271777

屈折率(21℃)=1.000270851

これより、大気中では温度変動 1℃に対して、屈折率(20℃)—屈折率(21℃)=1.037×10<sup>-6</sup>、より、光路長差変動=427nm,となる。しかしながら、光学系ベースの線膨張より(ベース材質;アルミニウム、線膨張係数=3.02×10<sup>-5</sup>)、自由膨張で光路長差の変動量は、12ミクロンに及ぶ。膨張度合いは大気中・真空中同じであるから、空気の屈折率の変動は1桁の相違があることにより、無視できる。しかしながら、大気中では、風の流れがあり、予想を超える圧力により、屈折率が時間と共に不定期に変わり、線膨張に対して無視できない場合も発生するだろう。

(3.の測定では大気中とはいえ、密閉された空間で、風の流れもない状態で計測している。したがって、 風を流した場合の測定を行う必要があろう。課題として残す。)

測定結果として、直線的変動を図4と同じように求めた。

分解能が保たれていることを確認するために、図6と同様に、隣り合うデータ間の差の時間的変化を図7 に示す。図6と同様に分布幅は狭く、標準偏差=0.077、を得た。空気中と比較して、その分布にノ イズ成分が減少していることが知れた。

他の条件がほとんど同じことから、真空中での測定は、空気の乱れによるノイズが抑えられたと判断できる。変位量絶対値の変動への寄与は小さくても、ノイズ発生に大きく関与することが知れる。



図7 真空中での隣り合うデータ間の差の時間変動
 大気中でのデータ(図6)に比し、そのノイズが小さいことが知れる。
 分布の標準偏差=0.077 [nm]。
 空気の乱れによるノイズが削減されていることが知れる。

Photon Probe, Inc.

8

5. 考察·反省

(1) CLK定数およびBEAT定数

これらプログラムにおいて使用する定数は基本的に、水晶発信機の温度依存性に依存する。信号処理回路の水晶は有効数字6桁の製品を使い、シフタドライバの水晶はPLL回路で、かつ、128分周しているので、有効桁数6桁以上ある。問題は有効桁数6桁で足りるか、である。

表1で示すように、測定を繰り返すと、データ間ばらつきが発生する。このばらつきが、水晶の安定度と 絡んでいるとすれば、大方一致する。このデータばらつきでリアルモードの多数点データを求めた際に、 結果に誤差が発生しないかとの危惧が生まれる。これは今後の長時間測定での検討項目である。

(2) 温度管理

熱容量の大きさから、測定温度と、光学系の実際の温度(光路長を決める温度)の間には時間的な開きが ある。この差を明確にすることは必要なことであろう。今後の課題としたい