

テクニカルレポート V o l . 1 4 - 3

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5月20日

題名 信号処理装置の縦分解能について

概要 ヘテロダイン処理系において、信号処理装置が縦分解能を有するか否かを、シンセサイザを用いて、リアルモードで検証する。

結論 2信号間の周波数差が1MHz以上の場合、理論どおりの分解能を得る。特にリアルモードでの、5分間計測において、その分解能は、1nm以下であった。繰り返し測定においてもその分解能は維持された。3種のシンセサイザを用いても同様な結果を得て、信号処理装置の特性を確認した。

報告内容

1. 信号処理装置について
2. 信号処理ソフトについて
3. 周波数差に対する理論について
4. 周波数差に対する実験について
5. 反省・考察

報告詳細

1. 信号処理装置について

細部に関しては、弊社の秘密事項（別紙秘密情報14-1）であり、本レポートで示すことはしない。

信号処理のアルゴリズムは、ヘテロダイン計測の理論に基づいている。

今回、サポイン用にリアルモードの主眼を置いたアルゴリズムを開発し、そのアルゴリズムに基づいたプログラムを作成した。このプログラムの作成において、バグの発生がたびたび起こり、試行錯誤を繰り返した。このプログラムにおいては、DA出力機能及びLED表示機能を割愛せざるを得なくなった。

（ヘテロダイン計測の理論については、文献（1）を参照のこと）

信号処理装置の特性を示す。

項目	仕様・特性
中心ビート周波数	2.5MHz
入力信号数	2ch
入力信号閾値	約0.24V
出力データ	変位量または速度
出力データ時間間隔	1μs
出力デジタル信号ビット数	32ビット
出力方法	メモリモード、リアルモードから選択

Optical Measuring Instruments and Parts

メモリモードでの最大記録点数	1 0 0 万点 (計測時間最小=1 s)
メモリモードでの平均化点数	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192、より選択(平均化点数に応じて出力時間間隔は長くなる)
リアルモードの出力時間間隔	0.1 s, 0.2 s, 0.5 s, 1 s より選択
リアルモードの平均化点数	4096, 8192, 16384, 32768, 65536、より選択(出力時間間隔により選択不可もある)
リアルモードの出力ビット	整数部+小数部で表現して、32+0, 28+4, 24+8, 22+12、より選択
信号制御方法	命令、および、設定定数を外部PCより信号制御装置に送り、信号制御装置よりデータを外部PCが受け取る。
信号制御装置とPC間ケーブル	ハーフピッチ50ピン (データ32、制御出力8、制御入力8、GND2) 1m長
PC側入力ボード	CONTEC製デジタル入出力ボード使用

2. 信号処理ソフトについて

信号処理装置は外部PCと結合され、PC側より命令や設定定数などを信号制御装置に送ることにより、信号処理装置を動作させる。そのためのアルゴリズムは信号処理装置の設定と合わせた。プログラムはNI社製のLabViewを用いている。

(詳細は秘密事項(別紙秘密情報14-2)なので、本レポートでは記載しない)

3. 周波数差に対する理論について

2信号の入力周波数(f_1 、 f_2)がわずかに異なれば、時間と共にその位相差が変動する。特に両信号が一定であれば、その位相差の変動は時間に比例する。

信号処理装置の中心ビート周波数を2.5MHzとしている。これを f_1 とする。もう一方の周波数 f_2 は2.5MHzよりわずかに異なっている。ヘテロダイン計測の理論より

このわずかな周波数差 $\Delta f = f_2 - f_1$ は、2つの信号原因となる対象物の移動量 ΔL に直結する。反射光を検出するシステムでは、 t 時間経過後の移動量 $\Delta L(t)$ は

$$\Delta L(t) = \lambda \times \Delta f / 2 \times t$$

と書かれうる。ここで、 λ は使用するレーザの波長である。温度と大気圧に依存する。

これは、 $\Delta L(t)$ と Δf は比例することを示している。

4. 周波数差に対する実験について

実験では、3社のシンセサイザを用いた。

- ① HP社製
- ② レクロイ社製
- ③ NF回路ブロック社製

3社の相違は結果的にほとんどなかった。ただし、①、②では周波数差を1Hz以下に出来なかったが、③は1 μ Hzまで可と公称されている。

Optical Measuring Instruments and Parts

そこで、③の結果のみを示す。

まず時間と共に、変位量が変動するグラフの一例を示す。周波数差を変えても同様な直線関係を得た。直線からのずれは、 $\pm 0.3 \text{ nm}$ の範囲に収まった。(直線からのずれの発生原因は、ずれに対する変動が周期的であることから、更に低周波でのシンセサイザの不安定性要素が問題だと思われる。)

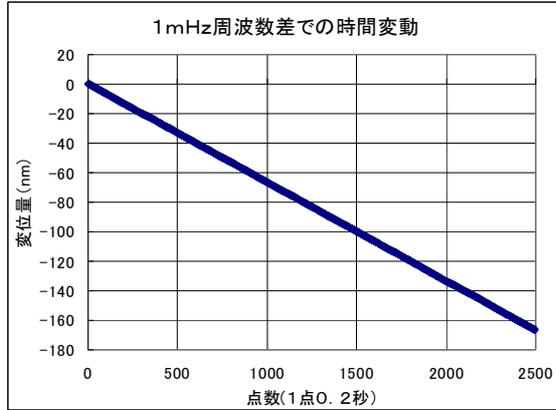


図1 1 m H z 周波数差での変位量の時間変動

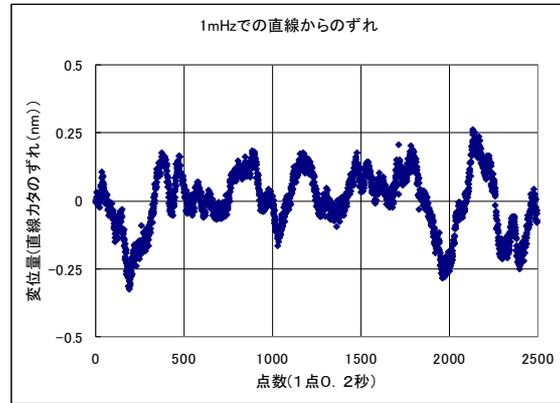


図2 直線からのずれ量の時間変化

最小二乗法により求めた直線式は

$$\text{変位量} = -0.333926 \times t + 0.362719 \quad [\text{nm}]$$

時間 t の単位は秒である。直線からのずれを見れば明白なように、直線関係はきわめて高い。これは理論との直線関係についての整合性を満足する。

基準となるレーザ波長は、 632.826188 [nm] 、である。

理論からは、傾き m に対して

$$m(\text{理論}) = -0.316413094$$

が予想されるが、実験値はかなり大きな差が発生しているように見える。正負に関しては、2信号の入れ替えて変動することだけを注目されたい。

このような方法で、周波数差に対して、 m 値を求めた。複数回のデータを示す。

周波数差 [Hz]	m 値 [nm/s]	理論とのずれ
1	-316.4595	理論値 = -316.41309 平均値との差 = -0.0466 差/理論値 = 0.000147 Max($\sqrt{(S/N)}$) = 0.216 (N=1500) 備考参照
	-316.4625	
	-316.4709	
	-316.4615	
	-316.4493	
	-316.4596	
	-316.4520	
	-316.4625	
	平均 = -316.4597 最大-最小 = 0.0216	
-1	316.4455	理論値 = 316.41309 差 = +0.0350 差/理論値 = 0.000111
	316.4496	
	316.4452	

Optical Measuring Instruments and Parts

	3 1 6 . 4 4 6 0 3 1 6 . 4 5 7 3 3 1 6 . 4 4 5 4 平均=3 1 6 . 4 4 8 1 最大—最小=0 . 0 1 2 1	$\text{Max}(\sqrt{(S/N)}) = 0.120$ $(N = 1500)$
0.5	-1 5 8 . 2 8 9 0 -1 5 8 . 1 7 3 1 -1 5 8 . 2 2 8 5 平均=-1 5 8 . 2 3 0 2	理論値=-1 5 8 . 2 0 6 5 5 差=-0 . 0 2 3 6 差/理論値=0 . 0 0 0 1 4 9
-0.5	1 5 8 . 2 0 2 4 1 5 8 . 2 7 0 7 1 5 8 . 2 1 2 2 1 5 8 . 2 1 9 2 平均=1 5 8 . 2 2 6 1	理論値=1 5 8 . 2 0 6 5 5 差=+0 . 0 1 9 5 5 差/理論値=0 . 0 0 0 1 2 3
0.1	-3 1 . 6 6 2 1 -3 1 . 5 9 2 9 -3 1 . 6 5 2 5 -3 1 . 6 5 3 7 平均=-3 1 . 6 4 0 3	理論値=-3 1 . 6 4 1 3 0 9 差=+0 . 0 0 1 0 0 9 差/理論値=-0 . 0 0 0 0 3 1 8
-0.1	3 1 . 6 2 7 2 3 1 . 6 9 4 0 3 1 . 6 3 9 6 平均=3 1 . 6 5 3 6	理論値=3 1 . 6 4 1 3 0 9 差=+0 . 0 1 2 2 9 差/理論値=0 . 0 0 0 3 8 8
0.05	-1 5 . 8 3 8 9 -1 5 . 7 7 1 1 -1 5 . 8 2 8 9 平均=-1 5 . 8 1 3 0	理論値=-1 5 . 8 2 0 6 5 5 差=+0 . 0 0 7 6 6 差/理論値=0 . 0 0 0 4 8 4
-0.05	1 5 . 8 0 5 1 1 5 . 8 7 3 1 1 5 . 8 1 8 6 平均=1 5 . 8 3 2 3	理論値=1 5 . 8 2 0 6 5 5 差=+0 . 0 1 1 6 差/理論値=0 . 0 0 0 7 3 6
0.01	-3 . 1 8 1 2 -3 . 1 1 3 6 -3 . 1 6 9 8 平均=-3 . 1 5 4 8	理論値=-3 . 1 6 4 1 3 0 9 差=+0 . 0 0 9 3 3 差/理論値=0 . 0 0 2 9 5
-0.01	3 . 1 4 7 7 3 . 1 6 3 3 3 . 1 6 3 3 平均=3 . 1 5 8 1	理論値=3 . 1 6 4 1 3 0 9 差=-0 . 0 0 6 0 3 差/理論値=0 . 0 0 1 9 1

Optical Measuring Instruments and Parts

0.005	-1.5982 -1.5313 -1.5895 平均=-1.5730	理論値=-1.5820655 差=+0.00907 差/理論値=0.00573
-0.005	1.5655 1.6310 1.5789 平均=1.5918	理論値=1.5820655 差=+0.00973 差/理論値=0.000615
0.001	-0.3339 -0.3262 -0.3247 -0.3244 平均=-0.3273	理論値=-0.31641309 差=+0.0108 差/理論値=0.0344
-0.001	0.3008 0.3663 0.3073 0.3478 平均=0.3306	理論値=0.31641309 差=+0.0142 差/理論値=0.0448
0.0005	-0.15875	
-0.0005	0.15789	
0.0001	-0.02006	
-0.0001	0.02582	
0.00005	-0.024779	
-0.00005	0.003245	

表1 周波数差に対する直線的な変位量変動結果に対して、直線近似をした場合の傾き値

1mHzを下回ると、ずれが大きくなり、十分な精度で測定できないことが知れる。

そこで、測定限界を、“周波数差1mHz”、と判断できる。

上記の関係を図3に示した。

(周波数差範囲を+200Hzから-200Hzに拡げて測定している。その関係グラフは、低周波領域以上に妥当なので、考察の項で表示する。)

(+200Hzから-200Hzの周波数領域での変位量と周波数の直線関係も同様に得られた。

低周波では、ビート中心周波数(2.5MHz)との差が小さくなるので、判別が困難になり、エラーが発生しやすくなる。)

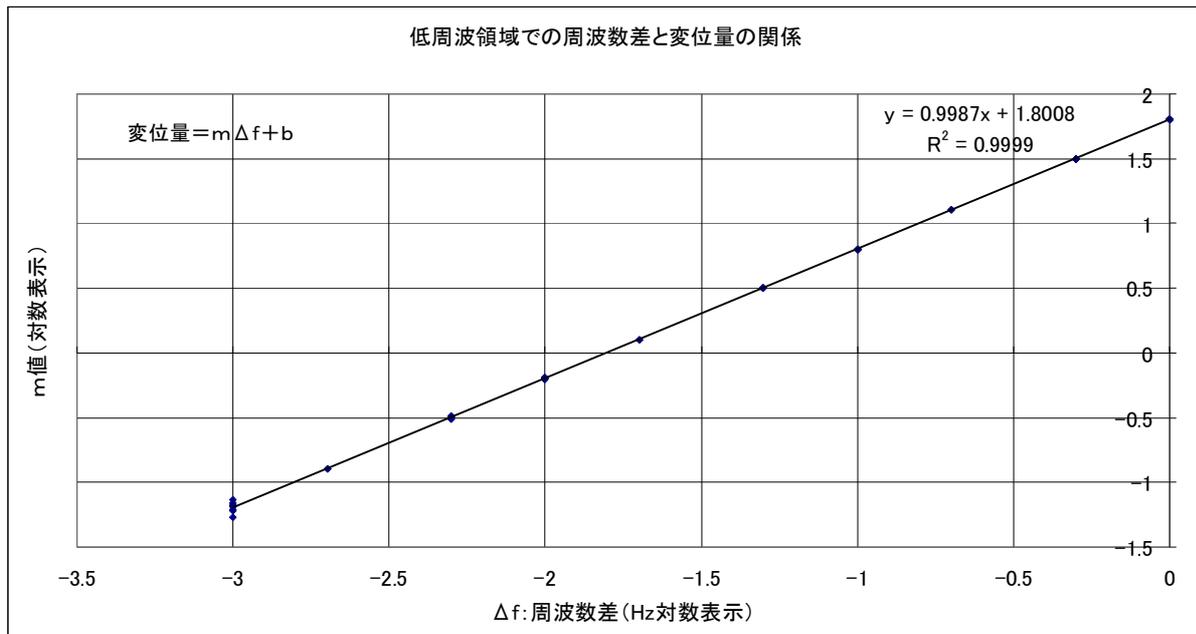


図3 低周波領域での周波数差と変位量の関係

これらはすべて直線関係を満足した。しかし、その傾きm値に関して、多少理論値とずれている。

このずれの原因は、時間のスケールを、信号処理装置の水晶発信機に基づいて計測していることによる。使用している水晶発信機は公称値が、120.0000MHzである。

これが公称値どおりに動作していれば問題はないが、これからずれていると、計測値が異なることは、すでにテクニカルレポート (Vol. 13-5) で示している。そこでは、水晶発信機の周波数として、119.99176MHzを算出している。

今回の測定においては、前回の周波数を計算の前提にしている。しかし、理論値との差よりも、データ間ばらつきが小さいことから、この周波数値を再検討してみる必要がある。

そこで、水晶発信機の周波数が前回の設定値とは異なるとして、m値にフィットする水晶周波数を求めた。

周波数差 [Hz]	理論値とフィットする水晶周波数 [MHz]	119.99176MHzとの差 [MHz]
1	119.9916125	-0.0001475
-1	119.9916493	-0.0001107
0.5	119.9916106	-0.0001494
-0.5	119.9916364	-0.0001236
0.1	119.9917919	-0.0000319
-0.1	119.9913716	-0.0003884

前回設定値より、0.00013MHz程度設定値を下げることで、理論との対応が出来ることが知られる。次回から、水晶振動子の周波数として

$$119.99162 \quad [\text{MHz}]$$

を用いることが好ましいであろう。

Optical Measuring Instruments and Parts

水晶振動子は水晶の特定方向の振動に依存するため、水晶長さに強く依存する。水晶とて温度と共に膨張するため、温度依存性を有する。理科年表によれば、水晶はその線膨張係数として、 6.8×10^{-6} 、値を有する。この膨張により、周波数が変動するとして、0.1度の温度変動に対して、周波数変動幅 Δf は

$$\Delta f = 120 \times 6.8 \times 10^{-6} \times 0.1 = 0.0000816 \quad [\text{MHz}]$$

現在、温度制御を積極的に行っていないため、測定間で0.1度の変動は十分起こりえる。

水晶振動子の温度特性に関して、メーカーからその特性が示されていない。

しかしながら、その温度特性がデータに強く関与することが知れた場合には、温度特性を評価する必要がある。

6. 反省・考察

理論的な変動との一致性は認められ、信号処理装置は2chの周波数が

$$1 \text{ ch}; \quad 2.500000000 \text{ MHz}$$

$$2 \text{ ch}; \quad 2.500000001 \text{ MHz}$$

である場合にも、リアルモード計測において、正確に測れることが示された。

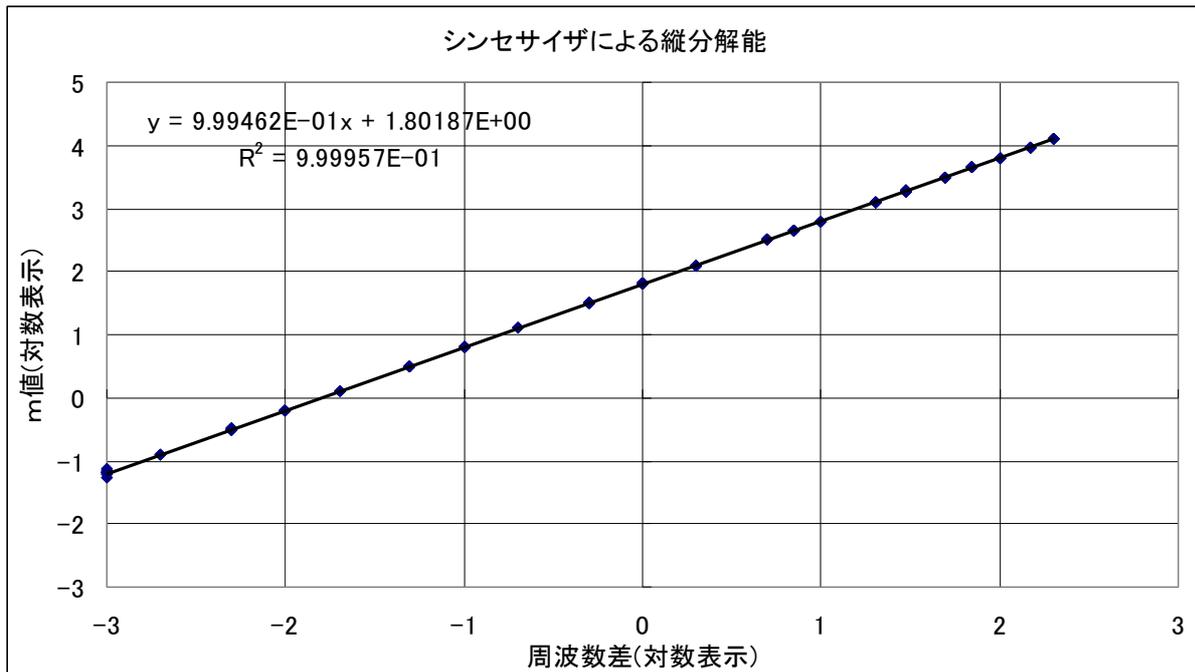
1mHzは1000秒(=16分40秒)の周期を有する振動なので、1 μ sの計測時間における位相変動は極めて小さい。高精度計測が出来ており、低周波ビート周波数の導入は必要ないと判断できる。繰り返しの平均数量が16384個なのも影響していると思われる。

温度依存性に関しては、温度制御がなく、受動的な温度データだけなので、依存性にいまひとつあいまいさが残る。ただし、計測時間中の温度変動がゆっくりであれば、温度制御なくても問題ないと判断できる。

<<リクロイ製のシンセサイザによる測定>>

周波数差 [Hz]	測定m値 [nm/s]	理論とのずれ 「%」
200	-12657.80	0.0100
150	-9493.33	0.0099
100	-6328.89	0.0099
70	-4430.23	0.0100
50	-3164.445	0.0106
30	-1898.665	0.0105
20	-1265.775	0.0104
10	-632.887	0.0103
7	-443.028	0.0119
5	-316.450	0.0124
2	-126.584	0.0156
1	-63.2946	0.0197
-1	63.2831	0.0015
-2	126.5715	0.0057
-5	316.4375	0.0084

- 7	443.0165	0.0093
- 1 0	632.8825	0.0096
- 2 0	1265.772	0.0102
- 3 0	1898.66	0.0103
- 5 0	3164.437	0.0104
- 7 0	4430.213	0.0105
- 1 0 0	6328.881	0.0105
- 1 5 0	9493.320	0.0105
- 2 0 0	12657.765	0.0105



HP社製、リクロイ社製、NF回路ブロック製のシンセサイザによる、周波数差とm値の関係。ひとつのデータに対して、最低1500点(5分間)の計測を行い、時間に対する変位量の変動が直線であることを得た。最悪のケースでもその直線からのずれは0.3nmであった。

備考

式中 $\sqrt{(S/N)}$ において、 $S = \sum (y_i - Y_i)^2$ 、である。

ここで、 y_i は $t = t_i$ でのデータ値、 Y_i は $t = t_i$ での直線表現での値、である。

文献 (1)

M.Hirano; "Handbook of Optical Metrology", Chapter 10,

Edit by T.Yoshizawa, CRC Press, New York, ISBN 978-0-8493-3760-4