

Figure-8 型モード同期レーザーの相対強度雑音による位相雑音評価

武者研究室 高木希

1. 序論

現在、日本の準天頂衛星測位システムの周波数基準にはルビジウムやセシウムを用いた原子時計が使用されている。その周波数安定度は、 10^{-12} 程度である。精度向上のためにヨウ素安定化レーザーの利用が考えられている。しかし、現行のシステムでは 200 THz のような光周波数領域を直接使うことは難しい。そこで、MHz 程度のマイクロ波周波数領域にダウンコンバートするために、高精度な光周波数コムを利用する。光周波数コムとは周波数軸上で等間隔に縦モードの並んだコヒーレントな光であり、このモード間隔(f_{rep})はマイクロ波周波数領域であるため、縦モード間隔を取り出すことで、周波数基準に用いることができる。光周波数コムの n 番目の縦モードをヨウ素安定化レーザーに同期することで、光のもつ高い周波数安定度をマイクロ波周波数領域にダウンコンバートすることができる。

本研究室では、光周波数コムを発生させるためのオシレーターとして Figure-8 型モード同期レーザーを開発してきた。高精度な光周波数コムを目指すためには、周波数揺らぎを小さくする必要がある。光周波数コムの周波数揺らぎは、繰り返し周波数 f_{rep} の揺らぎと、キャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} の揺らぎによって決定される。

本研究では、高精度な光周波数コムを目指すために、 f_{ceo} に着目した。 f_{ceo} の揺らぎは、光周波数コムの発生に用いられているオシレーターの励起用 LD の強度揺らぎが

一つの大きな要因となっていて、強度雑音に現れる。通常、 f_{ceo} の線幅を測定することで f_{ceo} の揺らぎを評価する。オシレーターの相対強度雑音(RIN)を下げれば、 f_{ceo} の線幅は狭くなるはずであるが線幅を測定することは難しい。そこで、様々な条件のもと、Figure-8 型モード同期レーザーの RIN を測定して比較する。特に、 f_{ceo} を制御して線幅を狭くした状態と制御をしていないフリーランの状態のモード同期レーザーの RIN を比較することで光周波数コムの周波数安定度に寄与の小さい、 f_{ceo} の制御の必要性について評価することを目的とする。

2. 原理

2.1 光周波数コム

光周波数コムの n 番目の縦モードの周波数は次の式で表される。

$$f_n = f_{\text{ceo}} + n f_{\text{rep}} \quad (1)$$

ここで f_{ceo} はキャリアエンベロープオフセット周波数、 f_{rep} は繰り返し周波数である。

理想的な光周波数コムでは、キャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} は0になるはずであるが実際には群速度と位相速度の違いにより0にはならない。

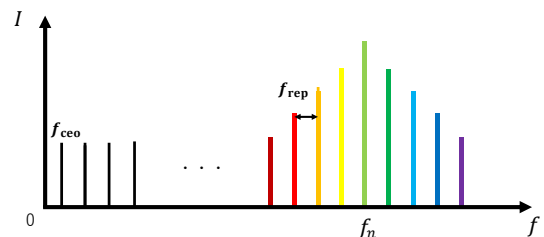


図1. 光周波数コムの概念図

光周波数コムの周波数安定度は次式で示される。

$$\frac{\delta f_n}{f_n} = \frac{\delta f_{ce0} + n\delta f_{rep}}{f_{ce0} + n f_{rep}} \approx \frac{1}{n} \frac{\delta f_{ce0}}{f_{ce0}} \quad (2)$$

ここで n が十分大きいとすると f_{rep} の安定度は近似的に次のように表せる。

$$\frac{\delta f_{rep}}{f_{rep}} \approx \frac{\delta f_n}{f_n} - \frac{1}{n} \frac{\delta f_{ce0}}{f_{ce0}} \quad (3)$$

(3)式から f_{ce0} の周波数安定度は本質的に f_n の安定度に対して $n (> 10^6)$ だけ小さく、 f_n が f_{rep} の周波数を大きく制限することが分かる。 f_n の安定度はヨウ素安定化レーザーと同期することで 10^{-15} 程度となり $n > 10^6$ であることから、 f_{ce0} の安定度が 10^{-9} 以下であれば、高い安定度を目的のマイクロ波である f_{rep} の安定度に移乗させることができる。

2.2 相対強度雑音(RIN)

相対強度雑音(RIN)とはレーザーなどにおける強度の雑音を平均強度で規格化した量である。100 kHz までの低周波数帯域においてはFFTアナライザを用いる。FFTアナライザで取得した値が a dBV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ としたとすると、RINの値は

$$\text{RIN} = \frac{V}{V_{DC}} = \frac{10^{20} a}{V_{DC}} \quad (4)$$

となる。

3. Figure-8型モード同期レーザーの開発

ストレッチパルスとRIN比較用のソリトンの2種類のFigure-8を作成した。

3.1 ストレッチパルス領域

ストレッチパルス領域のFigure-8は図2のような設計で作成した。利得媒質には80 dB/mのEDFを0.8 m、分散補償用とし

て7 dB/mのEDFを1.0 m使用した。分散値 β はそれぞれ0.020 ps²/m、0.0357 ps²/mであり、PM-SMFの β は-0.0223 ps²/mであることから設計段階での共振器全体の分散は0.00264と計算できる。

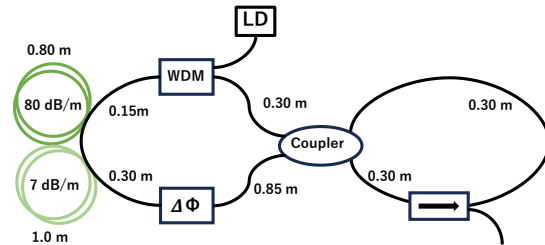


図2. ストレッチパルス Figure-8 設計図

図2中の $\Delta\Phi$ は非相反位相シフタを表しており、変調深さを得るために組み込まれている。励起用LDは、波長976 nmのものを使用している。

実際に作成したFigure-8のパルストレインと光スペクトルは以下ようになった。

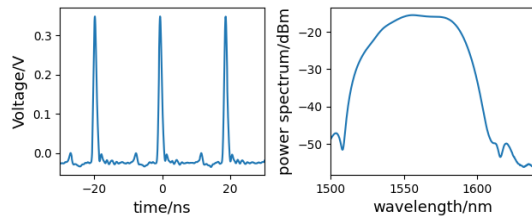


図3. パルストレインと光スペクトル

繰り返し周波数は52.17 MHzとなり、光スペクトルの3 dB線幅は48.50 nm、励起用LDの電流160.1 mAで0.601 mWの出力となった。

3.2 ソリトン領域

ストレッチパルス領域と同様にソリトン領域のFigure-8も図4のような設計で作成した。利得媒質には、80 dB/mのEDFを

1.0 m 使用し、設計段階での共振器全体の分散は、 -0.0469 と計算できる。励起用 LD はストレッチパルスと同じものを使用している。

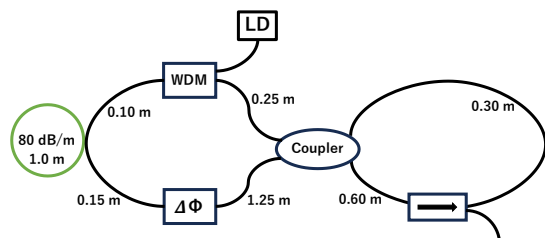


図 4. ソリトン Figure-8 設計図

実際に作成した Figure-8 のパルストレインと光スペクトルは以下ようになった。

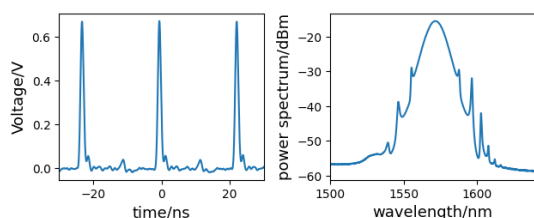


図 5. パルストレインと光スペクトル

繰り返し周波数は 44.14 MHz であり、光スペクトルの 3 dB 線幅は 10.72 nm、励起用 LD の電流 260.0 mA で 0.938 mW の出力となった。

4. RIN 測定

4.1 励起用 LD の RIN 測定

Figure-8 の安定度は励起用に使用している LD の強度安定度にも多少は依存する。そこで励起用 LD と同じ仕様の LD の出力を 100 mW, 200 mW, 400 mW と変化させながら RIN 測定をした。これらの測定結果を図 6 に示す。

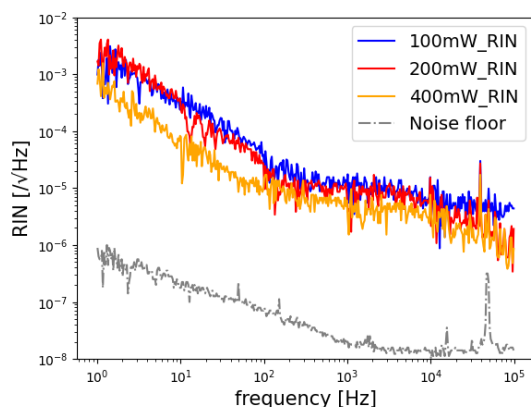


図 6. LD の RIN 比較

図 6 からパワーが大きいほどわずかではあるが RIN が小さくなっていることがわかる。このことからモード同期レーザーの励起用 LD の出力を大きくすることで RIN が小さくなり、 f_{ceo} の揺らぎが抑えられることが期待される。

4.2 ストレッチパルス、ソリトン Figure-8 の RIN 比較

3 章で作成した 2 種類のモード同期レーザーの RIN を測定し比較した。そのグラフを図 7 に示す。

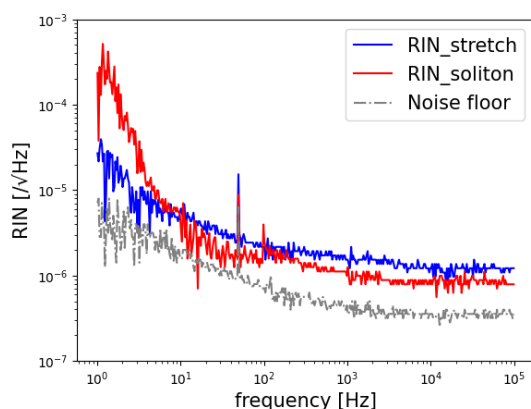


図 7. ストレッチパルスソリトン RIN 比較

図 7 から、ストレッチパルスの Figure-8 の RIN はソリトン領域のものよりも低周波数

帯域から高周波数帯域にかけてフラットである。ストレッチパルスとソリトンの RIN データを二乗平均平方根(RMS)で比較すると、その値はそれぞれ、 3.54×10^{-4} と 5.47×10^{-4} となり、ストレッチパルスの RMS のほうがわずかに小さくなった。これはソリトンの場合パルス形状を保って共振器内を周回し、非線形効果の影響を多く受けるからであると考えられる。

4.3 f_{ceo} 無制御時、制御時での Figure-8 の RIN 測定

ここでは、研究室にある私が作成していない f_{ceo} を制御できるストレッチパルス領域 Figure-8 型モード同期レーザーを用いて f_{ceo} 制御の有無で RIN の比較を行った。そのグラフを図 8 に示す。用いた Figure-8 の f_{ceo} 無制御時での出力は励起用 LD180.0 mA で 1.5 mW である。

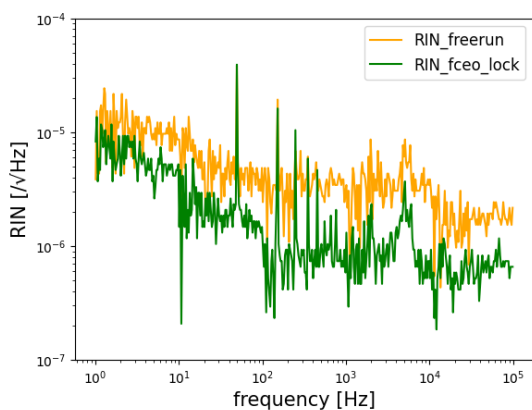


図 8. f_{ceo} 制御時と無制御時の RIN 比較

図 8 から、 f_{ceo} 制御時は無制御時と比べ周波数全域にわたって RIN が小さくなっていることが分かる。先ほどと同様に RMS で比較すると、 f_{ceo} 無制御時と f_{ceo} 制御時の RMS はそれぞれ、 6.94×10^{-4} と 2.51×10^{-4} となった。したがって、 f_{ceo} を制御し

て線幅が細いほうが無制御時に比べて RIN が小さくなることが実験的に示された。反対にモード同期レーザーの強度安定化を行うことで f_{ceo} 線幅が狭くなることが期待される。

5. まとめ、今後の展望

ストレッチパルス領域とソリトン領域の 2 種類のモード同期領域で Figure-8 型モード同期レーザーを作成した。また、様々な相対強度雑音を測定した。励起用 LD の出力の違いによる RIN 比較ではパワーが大きいほうが RIN が小さかった。ストレッチパルスとソリトンの Figure-8 の RIN 比較では RMS で比較すると、ストレッチパルスの方が RIN 小さかった。 f_{ceo} 制御時と無制御時の RIN 比較では f_{ceo} 制御時のほうが RIN が小さかった。

今後の展望として、位相雑音と強度雑音についてまだはっきりとは相関がつかめていないためさらなる考察を進めていき、モード同期レーザーの強度安定化を行い f_{ceo} 線幅が狭くなるかを確認し、最終的には f_{ceo} 検出フリーな簡易的な光周波数コムを目指す。