

衛星搭載精密マイクロ波発生装置の開発

武者研究室 田中祐志

1. 序論

昨今、日本独自の準天頂衛星測位システムである「みちびき」の構築がすすめられており、新システムの構築と、応用範囲の広範化に伴い、測位精度向上の要請が高まっている。精度向上のためには、測位に用いるマイクロ波の周波数安定度の向上が必要であり、そのためには現在の Rb 原子時計基準(周波数安定度 10^{-12})よりも高い安定度を持つ周波数基準が必要となる。

高安定基準の一つとして、ヨウ素安定化レーザー等の光領域周波数基準が挙げられる。光領域周波数基準は 10^{-15} 程度の高い安定度を実現可能である一方、マイクロ波領域の周波数基準として用いるには周波数のダウンコンバートを必要とする。安定度を保った周波数ダウンコンバートの手段としては光周波数コムを用いたものがある。光周波数コムは周波数軸上に等間隔に縦モードが並んだコヒーレントな光であり、詳細は後述するが光周波数コムと光周波数基準を同期させることで光周波数基準の安定度をマイクロ波周波数に移乗させることができる。

本研究では、この光周波数基準を用いた精密マイクロ波発生システムの実現に向け、振動に強い偏波保持ファイバーを用いた 8 の字型共振器を持つモード同期レーザーを作製し、これに対し共振器長の制御を行い、繰り返し周波数の安定化を行った。また、実際に宇宙空間で運用可能とするための宇宙環境試験に向け、その評価指標としてのソリトン動作モード同期レーザーを作成した。

2. 原理

2.1 NALM と Figure-8

モード同期レーザーにおいては、可飽和吸収機構が必要となる。可飽和吸収機構の例としては SESAM(半導体可飽和吸収ミラー)や NPR(非線形偏波回転)などが挙げられるが、これらの手法は空間光学系を持ち、外乱に弱くなり、宇宙空間での運用には適さない。そこで本研究では NALM(非線形ループミラー)に着目する。NALM は利得の非対称配置による、時計回り光と反時計回り光の非線形位相差を利用した可飽和吸収機構であり、全てファイバーを用いて構成することが出来る。

この NALM を用いたモード同期レーザーの例として、8 の字型(Figure-8 型)共振器が挙げられる。

Figure-8 共振器は図 1 のような構成をしている。このような共振器の構成を用いることで、共振器全体を光ファイバーで構成することが出来、堅牢なモード同期レーザーを実現できる。

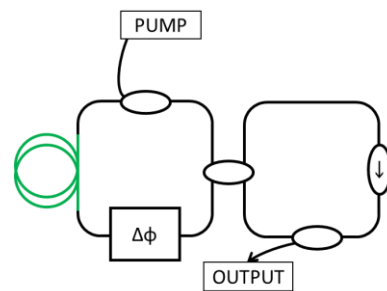


図 1. Figure-8 共振器の概略図

2.2 光周波数コム

光周波数コムにおいて、 n 番目の縦モードの周波数は次式で表される。

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

ここで f_{ceo} はキャリアエンベロープ位相差のフーリエ変換であり、 f_{rep} は時間領域において波形のビート周波数として現れる、マイクロ波領域の周波数である。光周波数コム概念図を次の図2に示す。

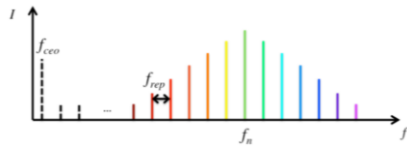


図 2.光周波数コム概念図

(1)式より、 f_n の安定度は次のように表される。

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{\Delta f_{ceo} + n \Delta f_{rep}}{f_{ceo} + n f_{rep}} \quad (2)$$

ここで n が十分に大きいとすると、逆に f_{rep} の安定度は次の(3)式で表される。

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

すなわち、 f_{ceo} の安定度の寄与は f_n に比べて小さくなり、 f_n を高安定な光周波数基準を用いてロックすることで、その安定度を f_{rep} に移乗させることが出来る。

3. 宇宙環境試験に向けたソリトン動作 Figure-8 モード同期レーザーの開発

本研究グループでは、将来的に光周波

数コムが発振器として使用するモード同期レーザーに対して宇宙環境試験を実施することを予定している。ソリトンモード同期レーザーでは、光スペクトル上にケリーサイドバンドと呼ばれる特徴的な構造が見られ、その間隔は共振器の分散の値により変化する。従って宇宙環境試験にソリトンモード同期レーザーを用いることで、ケリーサイドバンドの間隔から分散値の変化を読み取ることが出来、放射線被曝量と対比することで放射線の共振器内分散への影響を定量的に評価することが出来る。そこで本章では、宇宙環境試験での評価に用いるため、偏波保持ファイバーの一種である PANDA ファイバーを用いて Figure-8 ソリトンモード同期レーザーを作成した。

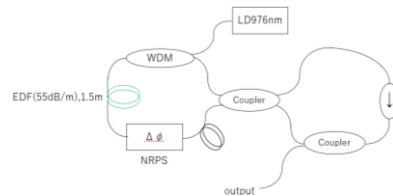


図 3 作成した Figure-8 モード同期レーザーの概略図

この Figure-8 モード同期レーザーでは、 $f = 0.5$ とし、利得媒質として Er 添加ファイバー (Erbium-Doped Fiber, EDF)を用いている。EDF の励起には外部光源として波長 976 nm の半導体レーザーを用いる。本研究では、NALM のループ中に非相反位相シフタ (Non-Reciprocal Phase Shifter, NRPS)を用いている。これは CW の光と CCW の光に逆向きの位相シフトを与えために用

いており、伝搬に伴う非線形位相差に加えてNRPSでも位相差を与えることで、より容易にモード同期を得ることが出来るようにしている。

作成したモード同期レーザーに用いたEDFはNufern社のPM-ESF-7/125であり、波長1530nmにおける吸収量は55dB/mであり、このEDFを1.47m用いた。このEDFの分散の値は $\beta_2 = -0.02 \text{ ps}^2/\text{m}$ である。また、モード同期レーザーに用いたPANDAファイバーの波長1530nmにおける分散の値は $\beta_2 = -0.022 \text{ ps}^2/\text{m}$ である。図3に示したように共振器を構成し、NRPSを調整したところモード同期を得ることが出来た。このモード同期レーザーから出力される光パルスの時間波形を図4、光スペクトルを図5に示す。



図4.光パルスの時間波形

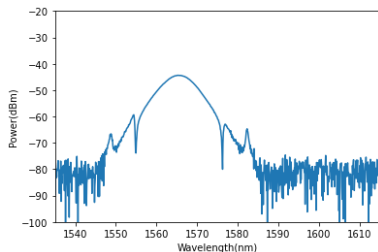


図5.得られた光スペクトル

このモード同期レーザーに対し、SMFのカットを行うことで分散を変化させ、これに対するスペクトルの変化

を取得したところ次の図6のようになった。

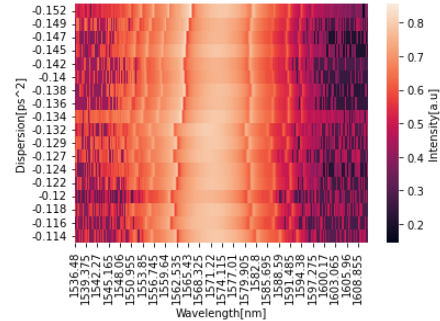


図6. 共振器の分散値とスペクトルの関係

また、この実験において1次と2次のケリーサイドバンド間隔の変化を分散に対してプロットすると次の図7のようになった。

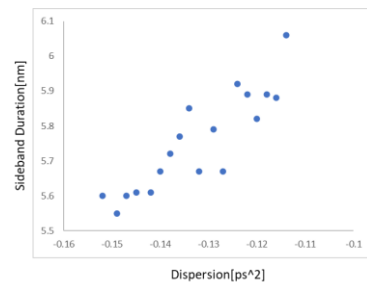


図7.分散とケリーサイドバンド間隔の対応

今後は今回の実験で得られた結果をもとに、宇宙環境試験においてスペクトルの変化を取得し、被曝による分散への影響の評価を行う予定である。

4. マイクロ波発生用ストレッチパルス動作 Figure-8 モード同期レーザーの開発

本章では光周波数コム化に向け、ストレッチパルス動作を行う Figure-8 モー

ド同期レーザーを作成し、これに対してマイクロ波基準を用いて共振器長の安定化制御を行い、繰り返し周波数の安定化を行う。

作成したストレッチパルスモード同期レーザーの概略図、光スペクトル、RFスペクトルを図 8,9 に示す。

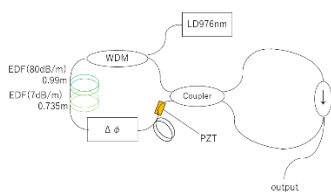


図 8.作成したモード同期レーザーの概略図

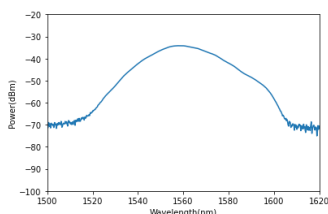


図 9.得られた光スペクトル

このモード同期レーザーに対し、図 10 に示すような制御系を用いて繰り返し周波数の安定化を行ったところ、図 11 に示すようにパルス繰り返し周波数を 2 時間半程度、マイクロ波周波数基準にロックすることが出来た。

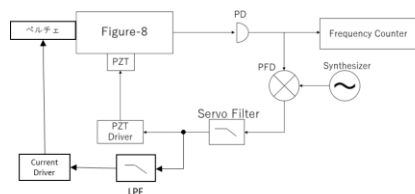


図 10. 繰り返し周波数安定化の制御系

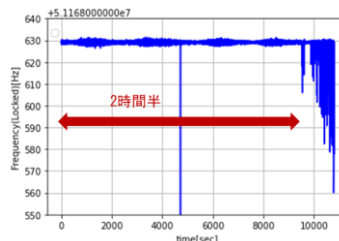


図 11. 安定化制御時の f_{rep} 変動(3 時間)

5. まとめと展望

宇宙環境試験に向け、NALM を用いた Figure-8 ソリトンモード同期レーザーを作成し異常分散ファイバー長の変更によって分散量と共振器長が変化した際の、スペクトルの変化の様子を取得した。今後は同レーザーに対して宇宙環境試験を行い、放射線暴露に対するスペクトルの変化を取得して、今回の実験結果と対比することで放射線の共振器への影響を調査する予定である。また、同様に NALM を用いた Figure-8 ストレッチパルスモード同期レーザーを作成し、パルス繰り返し周波数 f_{rep} の安定化制御を行い、ロック状態を 5 分間以上維持することに成功した。今後は制御回路の最適化を行い、 f_{rep} ゆらぎのさらなる抑制と、基準周波数に対する定常偏差の解消を予定している。制御系の設計が完了した後は、光領域周波数基準である狭線幅レーザーを用いて、ビート周波数の安定化を行う。