

衛星搭載用の光周波数コム

武者研究室 山田 隆寛

1. はじめに

現在、精密マイクロ波発生装置を人工衛星に搭載した日本の次世代測位システムの開発が進められている[1]。その中で、我々は測位精度向上のために人工衛星搭載用基準周波数の安定度向上に取り組んでいる。現在の周波数基準にはルビジウム周波数基準が用いられており、周波数安定度は 10^{-13} ~ 10^{-14} 程度である。更なる精度向上のためにルビジウム周波数基準よりも周波数安定度の高いヨウ素安定化レーザーを用いることを検討している。本研究においては、ヨウ素安定化レーザーの持つ高い周波数安定度(10^{-15})を光周波数コムによりマイクロ波周波数領域へダウンコンバートし高安定なマイクロ波を発生させることを研究目的としている。衛星搭載するためには低位相雑音性、堅牢性、セルフスタート動作安定性、長期動作安定性、宇宙環境動作が求められる。

2. 光周波数コム

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レーザーであり、光周波数コムの n 番目の縦モード f_n は繰り返し周波数である f_{rep} と、周波数軸上で原点に最も近い仮想的な0番目のモードであるキャリアエンベロープオフセット周波数である f_{ceo} を用いて式(2.1)のように表される。

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (2.1)$$

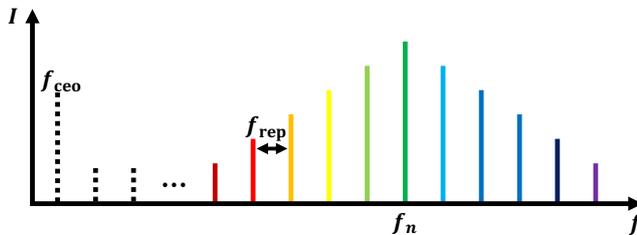


図 2.1 光周波数コムの概念図

f_{rep} は共振器内屈折率を n_c 、共振器長を L 、光速を c とすると、式(2.2)のように表される。

$$f_{rep} = \frac{c}{n_c L} \quad (2.2)$$

式(2.2)から共振器長 L を制御することで f_{rep} を安定化できる。

f_{ceo} は時間軸上におけるパルス列のキャリアと包絡線のピークのズレを表す。キャリア波と包絡線のピークのズレを $\Delta\phi$ とすると f_{ceo} は式(2.3)のように表される。

$$f_{ceo} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} f_{rep} \quad (2.3)$$

式(2.3)より、 f_{ceo} を安定化させるためには $\Delta\phi$ を一定値にする必要がある。 $\Delta\phi$ を一定にするためにはモード同期レーザーの励起光のパワーを調整し、共振器内屈折率を変化させる必要がある。

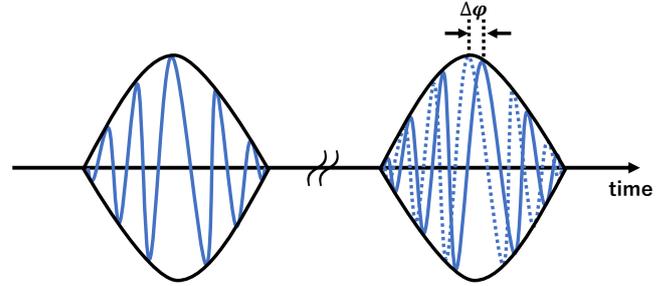


図 2.2 時間軸上での光周波数コムの概念図

f_{rep} を精密マイクロ波として取り出すためには f_n を光周波数基準に同期、 f_{ceo} の安定化をする必要がある。光領域の安定度をマイクロ波周波数領域にダウンコンバートされる原理を以下の式(2.4)に示す。

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{\Delta f_{ceo} + n \cdot \Delta f_{rep}}{f_{ceo} + n \cdot f_{rep}} \approx \frac{\Delta f_{ceo} + n \cdot \Delta f_{rep}}{n \cdot f_{rep}} \approx \frac{\Delta f_{rep}}{f_{rep}} \quad (2.4)$$

モード次数 n は 10^6 程度であること、 f_{ceo} はマイクロ波周波数領域であることから f_{ceo} の項を無視し、近似することができる。式(2.4)から n 番目の縦モード f_n を光の周波数に同期することで、光領域の高い周波数安定度をマイクロ波周波数領域へダウンコンバートすることができ、 f_{rep} を高安定なマイクロ波として取得することができる。

3. figure-8 型光周波数コムの開発

図 3.1 に光周波数コム全体の実験図を示す。光周波数コムは光源であるモード同期レーザー、 f_{rep} 制御系、 f_{ceo} 制御系から構成されている。

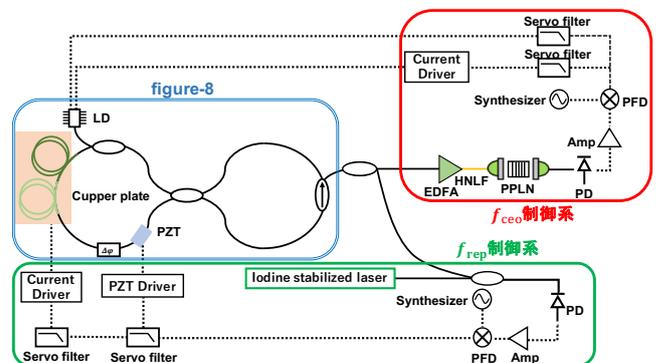


図 3.1 光周波数コムの全体実験図

3.1 figure-8 型モード同期レーザーの設計

衛星搭載用の光周波数コム設計の要求としてくり返し周波数 51.15 MHz、低位相雑音特性のためにストレッチパルス領域での発振、安定したセルフスタート動作が求められる。そこで光学的な設計要求を満たすために figure-8 型モードロックレーザーを開発した。開発した figure-8 の構成を図 3.2 に示す。作製した figure-8 は堅牢性を担保するために全て偏波保持ファイバーで構成されている。主利得媒質として 80 dB/m の濃度の EDF (Erbium Doped Fiber) を、分散補償用として 7 dB/m の EDF を用いた。共振器内分散は 0.0099 ps² である。励起光源には波長 976 nm の LD(Laser Diode)を用いた。高繰り返し化、安定したモード同期動作のために NRPS (Nonreciprocal Phase Shifter) を用いている。

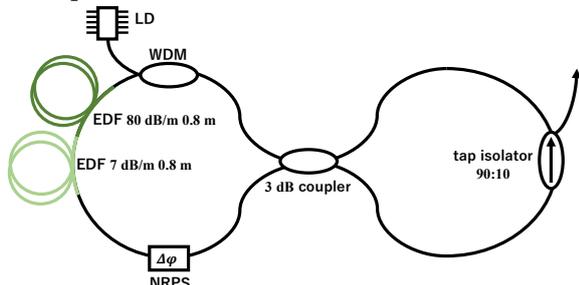


図 3.2 figure-8 型モード同期レーザーの構成図

作製した figure-8 の光スペクトルを図 3.3 に、時間波形を図 3.4 に、RF スペクトルを図 3.5 に示す。

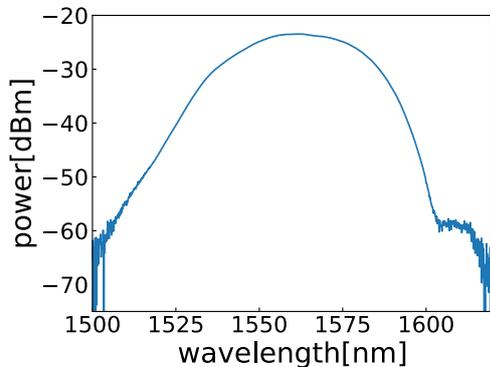


図 3.3 figure-8 の光スペクトル

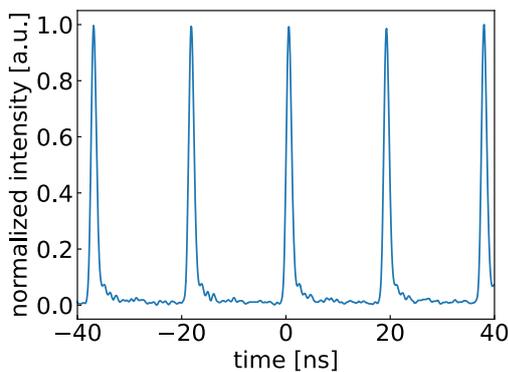


図 3.4 figure-8 の時間波形

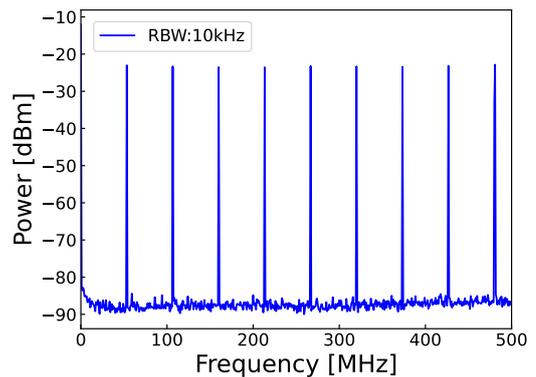


図 3.5 figure-8 の RF スペクトル

図 3.3 より、figure-8 の光スペクトルの 3 dB 線幅は 40.7 nm であり、ストレッチパルス領域での発振が確認された。繰り返し周波数は 53.4 MHz、平均パワーは 1.4 mW である。衛星搭載の要求値である 51.15 MHz を上回る繰り返し周波数であること、図 3.4、図 3.5 から全体に変調成分が乗っていない安定したモード同期であることが確認された。

3.2 f_{rep} のマイクロ波による長期位相同期

式(2.2)より、共振器長を制御することで f_{rep} は安定化される。共振器長制御の方法として PZT 素子による制御、温度制御がある。

f_{rep} のマイクロ波による長期位相同期の実験系を図 3.6 に示す。 f_{rep} のマイクロ波による位相同期は PD(Photo Detector)において f_{rep} を取得し、PFD(Phase Frequency Detector)において基準信号との誤差信号を取得し、servo filter を用いてファイバーに接着された PZT 素子へフィードバックする制御になっている。

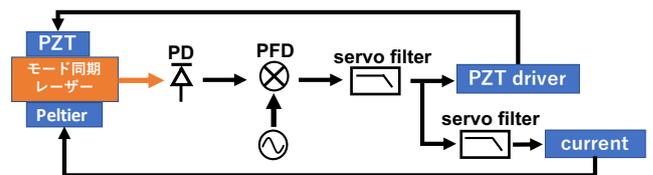


図 3.6 f_{rep} のマイクロ波による位相同期実験系

実際に使用しているファイバーに接着した PZT 素子の写真を図 3.7 に示す。



図 3.7 ファイバーに接着した PZT 素子の写真

安定した制御を行うために制御回路を作製し、オープンループゲインを測定した。シミュレーションと実測それぞれのオープンループゲインを図 3.8 に示す。

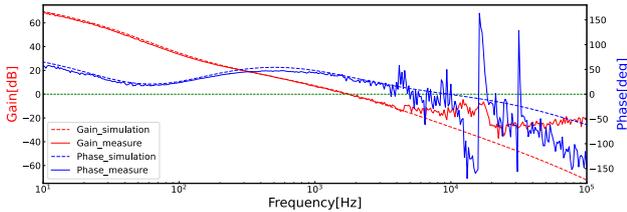


図 3.8 f_{rep} 制御時のオープンループゲイン

図 3.8 から、制御帯域は約 1.7 kHz、ユニティーゲイン周波数における位相余裕は約 40° である。

次に、 f_{rep} を長期に安定化するために温度制御を行った。ペルチェ素子を接着した銅板の上にファイバーを設置し、ペルチェ素子へフィードバックを行うことで温度制御を行うことができる。通常の f_{rep} 制御では PZT 素子による制御と温度制御を並列に行う。しかし並列制御は低域においてゲインが大きくなり、系全体が発振する恐れがある。そこで本実験では PZT 素子による広帯域精密制御を行った。実験室の温度変化により PZT 素子のコントロール信号が DC 的にドリフトしていく。そこで、ドリフト信号を温度で補償する形で長期安定化を行った。PZT 素子のコントロール信号の DC ドリフトをエラー信号とする servo filter を作製し、電圧電流回路に信号を入れ、ペルチェ素子へフィードバック制御を行った。PZT 制御信号の DC 電圧のドリフトを抑えることができているかの確認を行なった結果を図 3.9 に示す。図 3.9 は最初の 20 分間を無制御、次の 20 分間が PZT 素子による制御のみ、最後の 20 分間が PZT 素子による広帯域精密制御となっている。

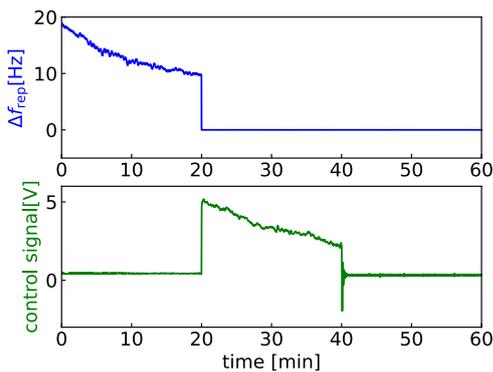


図 3.9 f_{rep} 変化とコントロール信号変化

図 3.9 から広帯域精密制御を行うことにより PZT 制御信号の DC 電圧のドリフトを抑えることが確認された。この実験系においてマイクロ周波数基準に対し f_{rep} の長期の位相同期を行なったところ 24 時間以上の長期安定制御が実現した。図 3.10 に制御時の f_{rep} 変化を示す。

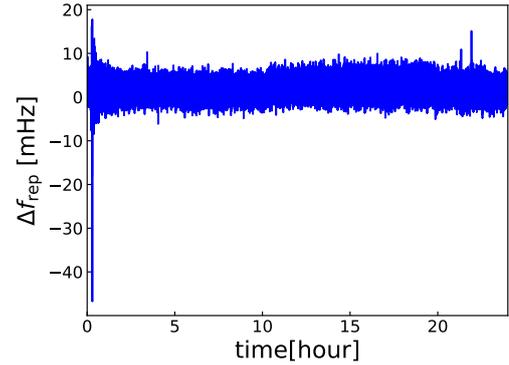


図 3.10 f_{rep} 制御時の応答

3.3 f_{rep} の光による同期

ヨウ素安定化レーザーの周波数安定度をマイクロ周波数領域にダウンコンバートするためには光周波数コム n 番目の縦モードである f_n とヨウ素安定化レーザーとのビート信号を制御する必要がある。実際に得られたビート信号を図 3.11 に示す。

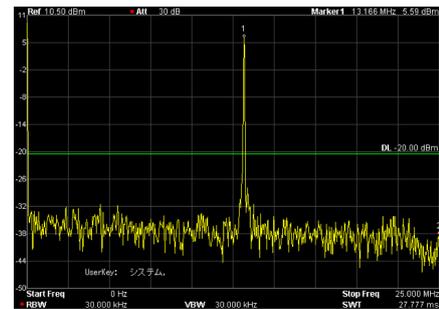


図 3.11 figure-8 とヨウ素安定化レーザーのビート信号

得られたビート信号は制御に必要な SN 比 30 dB 以上であったことから制御を行った。光による f_{rep} の同期の実験系を図 3.12 に示す。

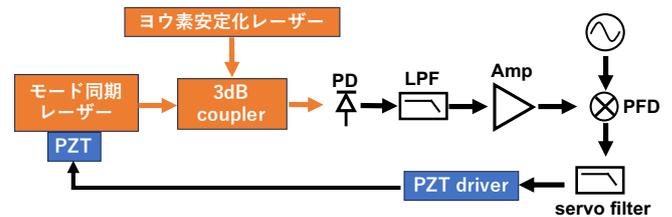


図 3.12 f_{rep} の光による同期の実験系

図 3.12 は、ヨウ素安定化レーザーと figure-8 の出力を 3 dB coupler で干渉させ、PD でビート信号を検出し PFD において基準信号とのエラー信号を検出し、servo filter を通して PZT 素子へフィードバックする系になっている。

安定した制御を行うために、系全体のオープンループゲイン(OLG: Open Loop Gain)を測定したのちに servo filter の設計を行った。設計した servo filter を用いた際の実験系全体のオープンループゲインのシミュレーション

ヨンを図 3.13 に示す。

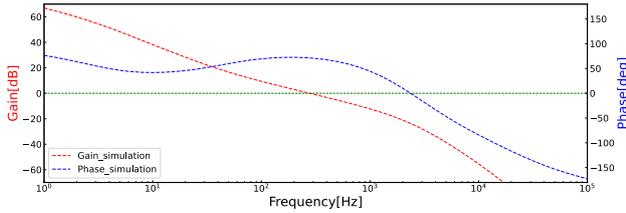


図 3.13 f_{rep} の光による同期系の OLG シミュレーション

作製した servo filter を用いて制御を行った。制御時のビート信号を図 3.14 に示す。

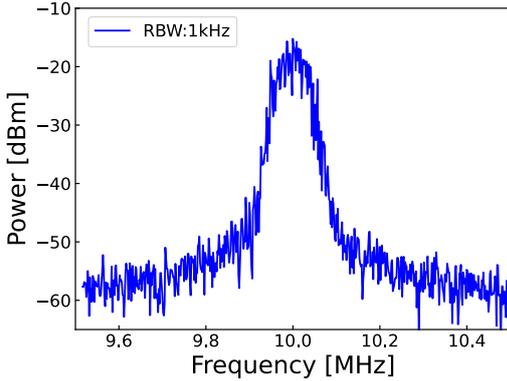


図 3.14 制御時のビート信号

図 3.14 より、得られたビート信号は基準信号である 10 MHz に対して周波数的に引き込まれていることが確認されたが位相同期はされなかった。ビート信号の概形から位相同期に必要な制御帯域は 50-100 kHz 程度であるが、図 3.12 より今回用いている PZT 素子の制御帯域は 180 Hz 程度であり、現在用いている PZT 素子では制御帯域が不足し位相同期を行うことができない。位相同期を行うためには現在用いている PZT 素子よりも高速応答が可能なアクチュエーターを使用する必要がある。

3.4 f_{ceo} の検出

f_{ceo} の検出を行うためには figure-8 の出力を EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)により増幅した後、HNLF(High Nonlinear fiber)に入力することで SC 光を検出し、 $f-2f$ 干渉計に入れる必要がある。

はじめに EDFA を作製した。作製した EDFA を図 3.15 に示す。作製した EDFA は吸収量 80 dB/m の EDF を 1.8 m、分散補償用に吸収量 7 dB/m の EDF を 1.5 m 用いており、これらを双方向励起している。パルス圧縮用に EDFA 後には SMF(Single Mode Fiber)を 1.2 m 融着している。



図 3.15 作製した EDFA

得られた EDFA 後のパワーは 90 mW であった。このパ

ワーの時、EDFA 後の出力を HNLF(High Nonlinear Fiber)へ入力した。その際に得られた光スペクトルを図 3.16 に示す。

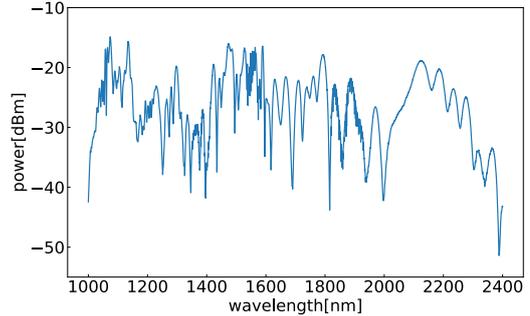


図 3.16 得られた SC 光の光スペクトル

図 3.16 より、得られた SC(Super Continuum)光は 1 オクターブ以上光スペクトルが広がっていることが確認できる。

f_{ceo} の検出を行うためには n 番目の縦モードの倍波である $2f_n$ と $2n$ 番目の縦モードである f_{2n} とのビート信号を検出しなければならない。そこで 2128 nm とその 2 倍波である 1064 nm を用いて f_{ceo} の検出を行うことにした。はじめに、2128 nm の 2 倍波である 1064 nm を非線形光学結晶である PPLN(Periodically Poled Lithium Niobate)を用いて検出を行った。実際に得られた 2 倍波を図 3.17 に示す。

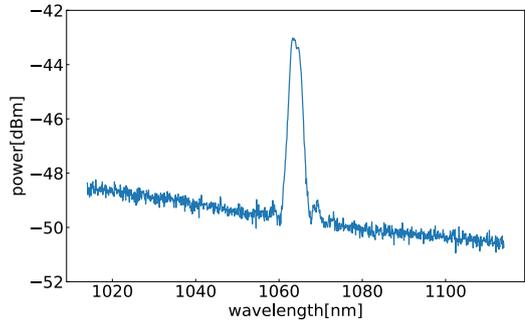


図 3.17 得られた 2 倍波の光スペクトル

得られた 2 倍波と基本波を干渉させるために、得られた SC 光を $f-2f$ 干渉計に入力した。 $f-2f$ 干渉計の概念図を図 3.18 に示す。バンドパスフィルター(BPF: Band Pass Filter)は 1064 nm 中心、ダイクロイックミラー(DM)は 1.5 μm などの雑音成分をカットするために挿入している。

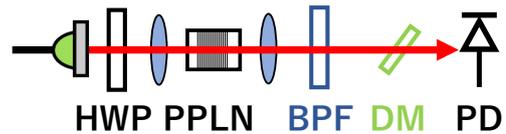


図 3.18 $f-2f$ 干渉計の概念図

基本波と 2 倍波を同時に $f-2f$ 干渉計に入れた後の光スペクトルを図 3.19 に示す。

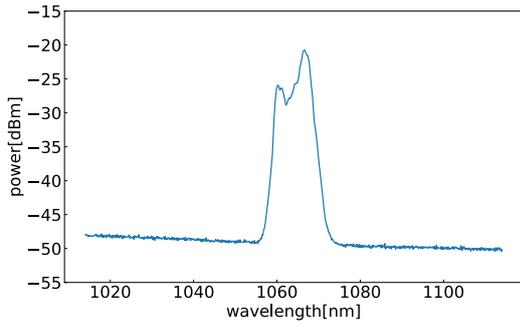


図 3.19 SC 光と 2 倍波の干渉時の光スペクトル

得られた 2 倍波と基本波の PD に入るタイミングを調整するために HNLF 後に SMF を 0.1 m 融着し分散を調整した。実際に得られた f_{ceo} 信号を図 3.20 に示す。

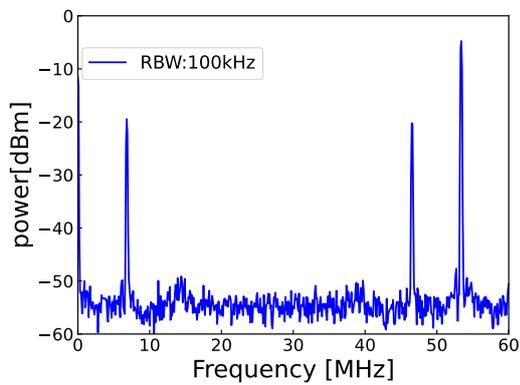


図 3.20 得られた f_{ceo} 信号

図 3.20 より f_{ceo} 信号、 $2n - 1$ 番目の縦モードと $2f_n$ とのビート周波数 $f_{rep} - f_{ceo}$ 、 f_{rep} 信号が検出された。 f_{ceo} 信号に関して、 f_{ceo} 制御に必要な RBW 100 kHz で SN 比 30 dB 以上で検出された。

3.5 f_{ceo} の位相同期

検出された f_{ceo} をマイクロ波周波数基準に対し制御を行った。 f_{ceo} 制御系について図 3.21 に示す。検出された f_{ceo} 信号を PFD において基準信号との誤差信号を取得し、 servo filter を通して LD へフィードバック制御する系になっている。

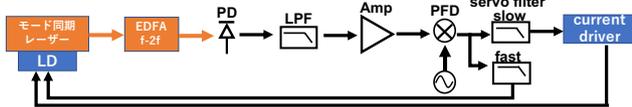


図 3.21 f_{ceo} 制御系

まず、 f_{ceo} を基準信号へ引き込むために励起用 LD のカレントドライバーへフィードバックを行う低速制御を行った。低速制御を行った際の f_{ceo} 信号を図 3.22 に示す。

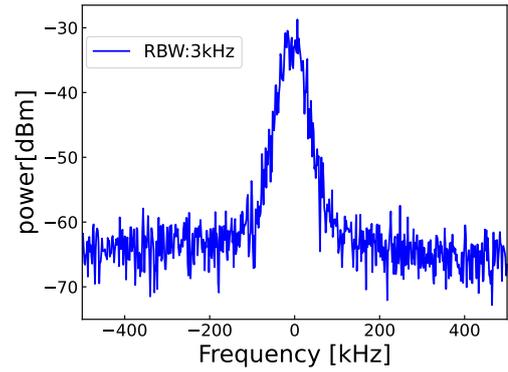


図 3.22 低速制御時の f_{ceo} 信号

次に、位相同期を行うために高速成分についてもフィードバック制御を行った。高速成分に関してはカレントドライバーを通さずに LD へ直接注入同期を行っている。高速制御を並列で行った際の f_{ceo} 信号を図 3.23 に示す。

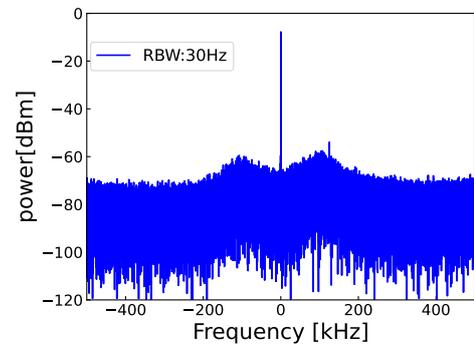


図 3.23 位相同期時の f_{ceo} 信号

図 3.23 より、制御帯域は 100 kHz 程度であり、キャリアピークが見えていることから位相同期されていることが確認された。しかし、この実験系において長期的に f_{ceo} の位相同期ができていない。原因として考えられるのは低速制御に用いているローパスフィルターでゲインをさらに上げると発振する恐れがあり、低域においてゲインを十分確保することができていないことが挙げられる。そこで、ラグリードフィルターを用いて位相補償を行いつつ低域のゲインを持ち上げることができれば f_{ceo} を長期的に位相同期を行うことができると考えている。

4. 放射線被曝試験

4.1 figure-8 型モード同期レーザーに対する宇宙環境試験の現状

これまでに figure-8 型モード同期レーザーに対し宇宙環境試験を行っており、熱・機械的試験は通過しているが放射線被曝試験に関しては課題が残っていた。以前 figure-8 型モード同期レーザーに対し被曝試験を行ったところ準天頂衛星軌道 16 年で受ける総被曝量 160 krad に対し 30 krad にてモード同期動作が停止してしまった [2]。この被曝試験の際、EDFL(Erbium Doped Fiber Laser) に対しても照射を行っており、被曝量が増えるにつれ

てレーザーの出力は減少していった。これらのことから、モード同期動作停止した原因として利得媒質の劣化が考えられる。

4.2 放射線被曝試験の結果と考察

以前の結果を踏まえ、放射線被曝試験の再実施を行った。セットアップを図 4.1 に示す。

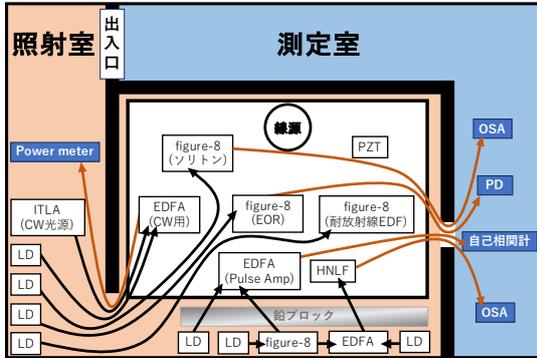


図 4.1 放射線被曝試験のセットアップ

本試験では前回の試験と同様に線源として ^{60}Co の γ 線 (2.5 krad/h) を用い、総被曝量 160 krad を照射した。照射させた光学系は耐放射線 EDF を用いて作製した figure-8 (照射中の光スペクトル変化)、HNLF (照射中の光スペクトル変化)、ソリトンモード同期レーザー (照射中の光スペクトル変化)、通常の EDF で作製したパルス用の EDFA (照射中の自己相関波形)、通常の EDF と耐放射線 EDF を用いて作製した CW 用の EDFA (照射中のパワー変化)、ファイバーに接着した PZT 素子 (照射前後の伝達関数)、耐放射線 EDF を用いて作製した figure-8 (EOR 機 : Electric Orbital Raising) (照射中の時間波形) である。本論文では耐放射線 EDF で作製した figure-8 と HNLF の試験結果について述べる。

まず、耐放射線 EDF を用いて作製した figure-8 の試験結果を図 4.2 に示す。

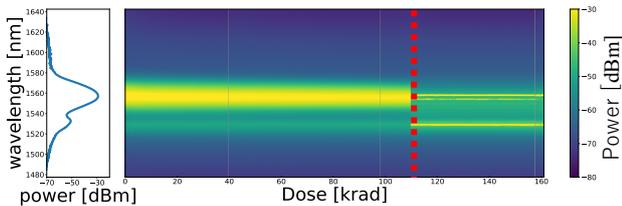


図 4.2 figure-8 の被曝量に対する光スペクトル変化

図 4.2 より、110 krad においてモード同期動作を停止した。この結果は以前の結果と比較して 3 倍程度向上した。しかし、要求値は 160 krad でありさらに向上させる必要がある。本実験で用いた figure-8 の光スペクトルの概形からどのモード領域で発振をしているのか判断ができない。モード領域によってどれくらい被曝の影響を受けるのかを確認するために分散に関して考慮した figure-8 を用いて被曝試験の再実施をする必要がある。

次に、HNLF の試験結果を図 4.3 に示す。

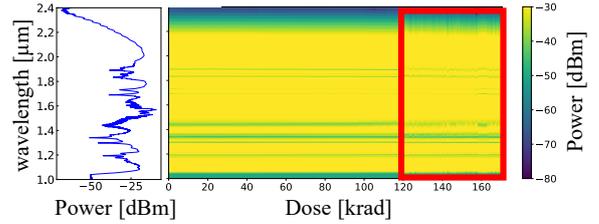


図 4.3 HNLF の被曝量に対する SC 光の光スペクトル変化

図 4.3 より、HNLF 後の SC 光の光スペクトル変化は 110 krad 以降で揺らぎが見られたが、光スペクトルに関しては広がったままであった。この結果から非線形性に対しては被曝の影響が大きく出ないことが確認された。

5. まとめ

衛星搭載用の光周波数コム光源として、低位相雑音性、堅牢性、セルフスタート動作安定性を満たした figure-8 型のモード同期レーザーを開発した。長期動作安定性を満たすために f_{rep} をマイクロ波周波数基準に対し PZT 素子による広帯域精密制御を行うことで 24 時間以上安定化した。高安定マイクロ波を得るためにヨウ素安定化レーザーと光周波数コム n 番目の縦モード f_n とのビート信号を制御する光による f_{rep} の同期に関して周波数的に基準信号への引き込みを実現した。 f_{ceo} 取得に向け、EDFA を作製し出力を HNLF に入れることで 1 オクターブ以上光スペクトルが広がった SC 光を検出した。得られた SC 光を f-2f 干渉計に入れることで制御に必要な SN 比 30 dB 以上で f_{ceo} を検出した。得られた f_{ceo} 信号に対し制御を行ったところ基準信号に対し位相同期が確認された。放射線被曝試験において耐放射線 EDF を用いて作製した figure-8 に対し照射させたところ、以前の結果として約 3 倍程度モード同期を維持した。HNLF に対して照射させたところ、SC 光の光スペクトル変化は 110 krad 以降で光スペクトルの揺らぎが確認されたが SC 光は検出され続けた。これらの試験結果から非線形性に対しては被曝の影響は大きく出ないことが確認された。今後に関して、光による f_{rep} の同期に関しては高速に応答するアクチュエータの選択、 f_{ceo} 制御に関しては長期位相同期に向け制御回路の最適化が求められる。放射線被曝試験に関しては耐放射線 EDF を用いて分散を考慮した figure-8 を照射したのちに、コム化したモード同期レーザーを照射させどのような応答を示すのか確認する必要がある。

参考文献

- [1] S. Matsushita et al. "Development of Laser-Optical Clocks for Future QZSS and Experimental Evaluation of a Seven-Satellite Constellation", Proc. of 54th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting (2021)
- [2] Y. Takauchi et al. "Figure-8 type optical frequency comb for spaceborne frequency reference", ICSO 2022 (2023)