## 精密マイクロ波発生用 figure-8 型光周波数コムの開発

武者研究室 栗原 大周

## 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 日本発の次世代測位システム計画が進められている[1]. その中で我々は,測位精度を決定する要素のひとつであ る人工衛マイクロ波周波数基準の精度向上に取り組ん でいる.現在周波数基準として用いられているのはルビ ジウム原子時計であり,その相対周波数安定度はδf/f= 10<sup>12</sup> 程度である.本研究ではより周波数安定度はδf/f= 10<sup>12</sup> 程度である.本研究ではより周波数安定度の高い周 波数基システムとして,ヨウ素安定化レーザーの光周波 数基準を光周波数コムによりマイクロ波にダウンコン バートするシステムを開発している.このシステムでは 光周波数安定度がマイクロ波に移乗されるため,光周波 数と同等程度の安定度を持つマイクロ波が発生可能と なり,現在の周波数基準より高い 10<sup>15</sup> 台の周波数安定 度が期待される.本研究の目的は,この新しい周波数基 準システムのための光周波数コムの開発である.

## 2. 光周波数コムによる精密マイクロ波発生

光周波数コムは図1のように周波数軸上での等間隔 な縦モードで構成されている.光周波数コムのn番目の 縦モードの周波数  $f_n$ は,縦モード周波数間隔(繰り返し 周波数: $f_{rep}$ )と周波数軸上で最も原点に近い仮想的な0 番目のモードの周波数であるキャリアエンベロープ周 波数 ( $f_{ceo}$ )を用いて次式で示される.

# $f_n = f_{\rm ceo} + n f_{\rm rep}$

ヨウ素安定化レーザーと $f_n$ のビート周波数 $f_{\text{beat}}$ を制御し、 $f_{\text{rep}}$ を目的のマイクロ波として取り出す.このとき、 $f_{\text{rep}}$ の安定度は次式で示される.

$$\frac{\delta f_{\rm rep}}{f_{\rm rep}} \approx \frac{\delta f_n}{f_n} - \frac{1}{n} \left( \frac{\delta f_{\rm ceo}}{f_{\rm rep}} + \frac{\delta f_{\rm beat}}{f_{\rm rep}} \right)$$

この式から $f_{ceo} \geq f_{beat}$ の周波数安定度の寄与は1/n(10<sup>6</sup>) となり、 $f_n \tilde{n}_{frep}$ の周波数安定度を決定することが分か る. そのため $f_{ceo} \geq f_{beat} \approx 10^9$ 台以上の安定度で制御す ると同時に $f_n \approx 3$ ウ素安定化レーザーに同期させるこ とによってヨウ素安定化レーザーの 10<sup>-15</sup>の周波数安定 度を $f_{rep}$ に移乗することが可能となる.



#### 3. モード同期レーザーの開発と制御

人工衛星に搭載する精密マイクロ波発生用の光周波 数コムは光学的特性と宇宙環境動作性の双方の面から 要求がある.光学的特性としては、高繰り返し周波数 (51.15 MHz), セルフスタート動作, 低位相雑音, 周波 数制御性が求められる. 宇宙環境動作性として, 堅牢性, 長期動作安定性, 耐宇宙線被曝, 小型・軽量であること が求められる. 宇宙環境動作性を重視し, 光周波数コム の光源に用いるモード同期レーザーとして外乱に強い PM (Polarization Maintaining) ファイバーで構成可能であ る NALM (Nonlinear Amplifying Loop Mirror)を採用した. NALMにはfigure-9型とfigure-8型の2つの構成がある. figure-9 型は高繰り返し化、セルフスタート動作が容易 であるが, 共振器の一部が空間光学系で構成されること から堅牢性及び長期動作性に懸念があるため、共振器を 全てファイバーで構成が可能である figure-8 型モード同 期レーザーを選択した. figure-8 型は高繰り返し化やセ ルフスタートが難しく,また figure-9 型と比較して位相 同期後の位相雑音が悪いという報告があり[2]、これらの 光学的特性の向上が課題となる.

## 4. figure-8 レーザーの開発

開発した figure-8 型モード同期レーザーの構成図を図 2に示す. 堅牢性向上のため共振器は PM ファイバで構 成した.利得ファイバーには濃度の異なる 2 種類の EDF (Erbium Doped Fiber)を使用し、主利得ファイバーとして 80 dB/mの濃度の EDFを使用した一方で、7 dB/m の EDF を主に分散補償のために導入した.低位相雑音のために ストレッチパルス動作をするように調整を行った結果、 共振器内分散は -0.0045 ps<sup>2</sup> となった.励起用の半導体 レーザーは 976 nm 発振のものを用いた.また、高繰り 返し化とモード同期動作を容易にするために NALM の ループ中には NRPS (Nonlinear Phase Shifter)を導入した.



得られた光スペクトルとパルスの時間波形を図 3,4 に それぞれ示す.光スペクトルの半値全幅は40.9 nmであ り,ストレッチパルスに特徴的な広いスペクトルが確認 された.繰り返し周波数は53 MHz である.



この figure-8 レーザーはセルフスタート動作を実現した. セルフスタート動作はここでは、外敵摂動を必要とせず 励起光操作のみで安定なモード同期状態を得ること指 す.セルフスタート動作を実現できた要因のひとつとし ては、利得ファイバーに 80 dB/m と高濃度の EDF を用 いたことが考えられる.全て PM ファイバーで構成され た NALM は非線形偏波回転等と異なり、モード同期の シードパルスとなる外部からの変調を受けにくいため、 高濃度の EDF が可飽和吸収のような働きをすることに よって共振器内の変調深さを高めた可能性が考えられ る.また、半導体レーザーの励起電流をプログラミング し自動化することによって実験室環境で 90 %以上のセ ルフスタート動作の成功率を実現した.

## 5. *f*<sub>ceo</sub>検出

figure-8 のf<sub>ceo</sub>を検出するため, EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)を共振器に用いたものと同様の2種類の

EDF を使用して作成した. EDFA によって増幅したパル スの自己相関波形を図 5 に示す. 自己相関波形を sech<sup>2</sup> 型でフィッティングしたところ,パルス幅は 45.2 fs と 得られた. また,増幅後の平均出力パワーは 70 mW で あったことから,パルスのピークパワーは繰り返し周波 数を考慮して 30 kW であることを確認した. EDFA 増幅 後のパルスを HNLF (High Nonlinear Fiber)に入射し,広帯 域化させた SC (Super Continuum)光の光スペクトルを図 6,7 に示す.



図 5 figure-8 レーザーの EDFA 後の自己相関波形



図6 光スペアナで測定した HNLF 後の光スペクトル



図7 分光計で測定した HNLF 後の光スペクトル

図 6,7 から 1000 nm から 2000 nm までのスペクトルの 拡がりが確認されたため,f-2f 干渉計を用いて $f_{ceo}$ の検出 を行なった結果を図 8,9 に示す.図 8 から制御に必要 とされる SNR30 dB を達成した.また半値全幅は約 15 kHz であり、フリーランでは細い線幅が得られた.



## 6. f<sub>rep</sub>制御

開発予定の光周波数コムの概要を図 10 に示す. 共振器 の出力は,  $f_{rep}$ の制御系と $f_{eo}$ の制御系の部分にそれぞれ カプラーで分けられる.  $f_{eo}$ の制御系では, f - 2f 干渉計 で $f_{ceo}$ を検出し, 共振器の励起用半導体レーザーの電流 源にフィードバック制御することにより基準マイクロ 波信号に位相同期する.  $f_{rep}$ の制御系では, 光増幅をし た後ヨウ素安定化レーザーとのビート信号を検出し, 共 振器中の EDF を貼り付けた銅板の温度とピエゾ素子を 制御することによりビート信号を参照信号と位相同期 する. 現段階では,  $f_{rep}$ を直接シンセサイザの信号に対 して同期して制御を行った.



ピエゾ素子による*f*<sub>rep</sub>の制御結果を図 11 に示す. 測定開 始約 50 秒まではフリーランで*f*<sub>rep</sub>は変動しており,そこ から制御を開始した. 測定開始から 400 秒程度経過した 時点で制御が外れたことが確認できるが,これはフリー ラン時のドリフトによる*f*<sub>rep</sub>の変動がピエゾ素子のダイ ナミックレンジ (約 30 Hz)を超えたためである.そのた め,フリーラン時のドリフトを温度制御によって抑える ことが必要となる. ピエゾ素子による制御時の周波数ゆ らぎは 0.05 Hz 以下である. 銅板の温度制御による*f*<sub>rep</sub>の 制御結果を図 12 に示す. 図中の temperature は空気の温 度変化を表している.制御時 *f*<sub>rep</sub>は空気の温度変化に対 して追従せず一定の周波数に制御され,この時の周波数 ゆらぎ幅は 10 Hz 以下であり,ピエゾの可制御域内に抑 えられたため,長期安定動作が可能となる.



温度制御とピエゾ素子による*f*<sub>rep</sub>制御の結果を図 13 に 示す.制御が外れてしまっているパターンが散見される が,12時間にわたって*f*<sub>rep</sub>を一定の値に制御することが できた.サーボフィルターの設計を最適化することで制 御外れを抑制し,長期安定化が可能となる見込みである.



図13 温度とピエゾ素子によるfrep制御結果

#### 7. 環境試験

開発した figure-8 型レーザーが宇宙環境において運用 可能か調査するため,宇宙環境を想定した試験を実施した.

## 7.1 振動試験

振動試験は、準天頂衛星軌道上において想定される擾 乱を模擬,figure-8 型レーザーに与える影響を調査する 目的で実施し、モード同期の安定性とセルフスタートの 再現性について調査をした.試験のセットアップを図14 に示す.アルミ板に接着した figure-8 型レーザーを励起 している半導体レーザーの励起電流をリモートコント ロールすることにより安定したセルフスタートが可能 である.加える振動の加速度を一定としてセルフスター トの成功率を調査した結果を図15 に、加える振動の周 波数を一定として加速度を変化させた際のセルフスタ ートの成功率を調査した結果を図16 に示す.測定は各 点において100 回実施した.



図14 振動試験セットアップ(左)及び写真(右)



図15 セルフスタート成功率の加振周波数依存性



図16 セルフスタート成功率の加振加速度依存性

周波数依存性,加速度依存性の調査を通じて94%以上の セルフスタートの再現性が確認され,無振動時と比較し て劣化は確認されたなかった.また,モード同期の安定 性についても劣化は確認されなかった.

## 7.2 熱試験

熱真空試験は真空下かつ温度変化の激しい宇宙環境 を模擬し figure-8 型レーザーへの影響を調査する目的で 実施し、モード同期の安定性、セルフスタートの再現性 に加え、温度による $f_{rep}$ 制御性について調査した.熱真 空試験で使用した figure-8 型レーザーは可搬可能な小型 アルミ得体 (200 mm×150 mm×60 mm) に収納し、EDF 部分を貼り付けた銅板の温度によって $f_{rep}$ を制御できる よう作成した (図 17). JAXA の1 m チャンバーを使用 し、真空下で-20℃から 65℃まで環境温度を変化させて 試験を実施した.結果としては、モード同期の安定性、 セルフスタートの再現性、温度による $f_{rep}$ 制御性に劣化 は確認されなかった.この試験ではモード同期レーザー のみが対象であったため、光周波数コムとして運用する 際に温度耐性が不安視される PMHNLF の温度耐性につ いて熱試験を実施した.



図 17 熱真空試験で使用した figure-8

熱試験の実験概要図を図 18 に示す. figure-8 型レーザ ーからの出力を EDFA で増幅後,銅板に貼り付けた PMHNLF に入射し,銅板の温度を変化させたときの SC 光の変化を光スペアナでモニターした.銅板の温度を上 昇させる際にはヒーターを使用し 20℃から 40℃まで, 低音にする際にはドライアイスを使用し-60℃から 20℃ まで温度変化を与えた.



図 19, 20 をみると、スペクトル全体への形状の変化は 見られないが、特定の波長域で最大 20 dB 程度の細かい パワーゆらぎが確認できる.このパワーゆらぎは温度を 一定とした場合には確認されなかったため温度に起因 して現れたと考えられる.f-2f 干渉計でビートをとる 1000 nm 及び 2000 nm の波長ではパワーゆらぎが顕著に みられないためf<sub>ceo</sub>の SNR に大きく影響することはない と考えられるが、今後はf<sub>ceo</sub>の観測を踏まえた熱試験の 実施の必要があるといえる.また、パワーゆらぎが生じ る原因の調査についても課題である.

#### 7.3 被爆試験

被爆試験は、figure-8 型レーザーの放射線被曝による 劣化の調査を目的とする. 調査項目は、国際宇宙ステー ション軌道1年間の総線量である3krad でのセルフスタ ート再現性と、準天頂衛星の設計寿命16年分である160 krad でのモード同期の安定性の検証である. 試験概要図 を図 21 に示す. オレンジ色で示した部分が被爆する領 域である. この試験では figure-8 型レーザー、励起用半 導体レーザー (976 nm)、連続発振の Er 添加ファイバー レーザーを励起波長 976 nm と 1480 nm のものを1台ず つ被爆させた. figure-8 型レーザーと Er 添加ファイバー レーザー を励起する半導体レーザーは被爆領域の外に 設置した. figure-8 型レーザーはセルフスタート動作を リモートコントロールできるようセッティングした. 試 験結果を図 22, 23 に示す.







図23 被曝量に対するパワーの変化

総被曝量3kradまでのセルフスタートの成功率に劣化は 確認されなかった.その後被曝を続けると光スペクトル が徐々に狭くなり,被曝量が約30kradに達した時点で モード同期が停止した.図23をみると,被曝量が増え るにつれてEDFLの出力が劣化することが確認できるこ とから,被曝によってEDFが損傷したことによりEDF のゲイン,あるいは共振器のゲインが小さくなったこと でモード同期が停止したと考えられる.しかしこの試験 のみではモード同期が停止した原因を調査するには難 しく,追加試験で詳細な調査が必要である.また,figure-8型レーザーが準天頂衛星の設計寿命16年分の被曝に 耐えられない場合には,耐被曝ファイバーを用いたモー ド同期レーザーの作成等の対策が必要となる.

#### 8. まとめ

全偏波保持ファイバー構成の figure-8 型モード同期レ ーザーを開発した. 課題とされる高繰り返し周波数化, セルフスタート動作の安定した再現を達成した. 観測し た fceoの SNR は 30 dBm を達成し, フリーラン時の半値 全幅は15 kHz 以下であり, figure-8 の課題であった位相 同期に十分な低位相雑音を得られた. frepのピエゾ制御 を行い周波数ゆらぎ幅は 0.05 Hz 以下であった.長期安 定化のために温度制御を併せて実現した.また,各種環 境試験を実施した. 振動試験の結果, セルフスタートの 過信加速度/周波数依存性は確認されず,モード同期の安 定性にも劣化は確認されなかった. figure-8 型レーザー のみを対象とした熱真空試験の結果,モード同期安定性, セルフスタート再現性, frep制御性について問題は確認 されなかったが、PMHNLF 入射後の SC 光のパワーに温 度依存のゆらぎが確認された. 被爆試験の結果, 被曝量 3 krad までのセルフスタート再現性に劣化はみられなか ったが、約30 krad の被曝量でのモード同期の停止が確 認された. 今後の課題としては、fceoの位相同期及び位 相雑音特性の詳細な評価を行い、最終的にはヨウ素安定 化レーザーと光周波数コムの同期を行いマイクロ波の 発生を目指す.また、各種環境試験を追加で実施し、特

に被曝耐性について調査と対策を進めていく.

## 参考文献

[1] 河野功第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2019-4714(2019)

[2] N.Kuse et al., Optica, 24, 2095-3102(2016)