

堅牢な光周波数コムのための全偏波保持 figure-8 モード同期レーザーの開発

武者研究室 栗原 大周

1. 研究背景・目的

現在準天頂衛星による次世代測位システムの打ち上げ計画が進められている。測位システムの高精度化の一つとして、高精度マイクロ波基準が重要な要素となる。この高精度マイクロ波基準として用いられる装置の一つとして、光周波数コムがある。光周波数コムとは、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、その特徴から「光のものさし」とよばれる。光周波数コムは周波数コンバーターとして利用することができ、光領域のもつ高い周波数安定度を光周波数コムの縦モード間をビートとして検出することによりマイクロ波に移譲させることで、より安定なマイクロ波基準をつくることができる。光周波数コムを人工衛星に搭載するには、堅牢性、長期安定動作、耐宇宙環境性が要求される。本研究では、特に堅牢性に注目し人工衛星に搭載可能な光周波数コムの開発を行った。光周波数コムはモードロックレーザーという超短パルスを出力するレーザーを制御することで得られ、その光源として広く用いられるモードロックレーザーの方式として非線形偏波回転(NPR)がある。非線形偏波回転は高出力化、短パルス化、低雑音性に優れているが、偏光を利用した機構のため温度変化や振動等の環境変動に敏感であり、人工衛星に搭載しての利用に適していない。対して、非線形ファイバーループミラー(NALM)と呼ばれる方式は偏光を利用しないため、共

振器を全て外乱に強い偏波保持ファイバーで構成することが可能である。そこで本研究では、光周波数コムの光源としてNALMを採用し開発を行った。

2. 光周波数コム

光周波数コムは、周波数軸上に櫛のように等間隔に縦モードが並んだコヒーレントなレーザーである。光周波数コムの n 番目の縦モード周波数 f_n は、繰り返し周波数 f_{rep} と周波数軸上で原点に最も近い仮想的な 0 番目のモードの周波数であるキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} とを用いて次式のように表される。

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

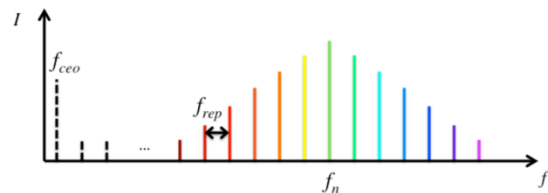


図1 光周波数コムの概念図

3. figure-8 の開発

図2のような構成の figure-8 を作成した。EDF(PM-ESF-7/125) は吸収量が 1530 nm 帯で 55 dB/m であり、1.46 m 使用した。共振器長は約 4.53 m であり、全て PMF を使用した。また、EDF を含めてファイバーは全て異常分散であり、全分散量は約 -0.123 ps^2 である。励起用 LD は中心波長が 976 nm で、

励起電流 900 mA で 500m mW の出力パワーを確認したものを使用した。

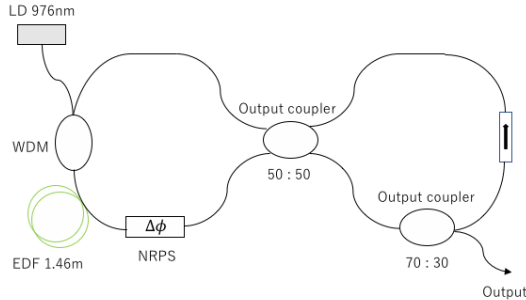


図3 figure-8 の概略図

励起パワーを最適化したときに得られたモード同期のスペクトルと時間波形は図4のようになった。

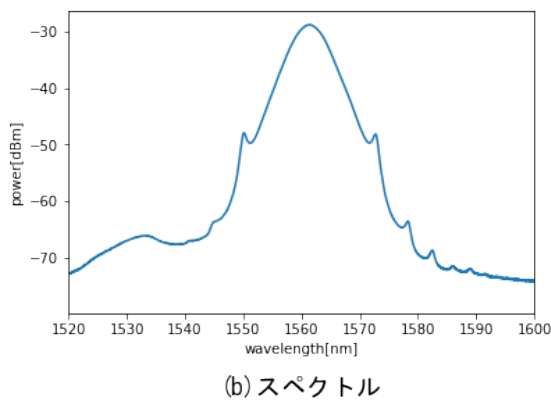
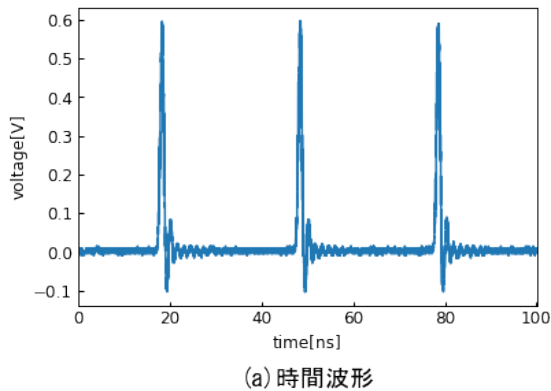


図4 figure-8 の時間波形およびスペクトル

繰り返し周波数は 34 MHz、スペクトルの半値全幅は 5.53 nm だった。作成した figure-8 は全分散量が異常分散の大きい構成となっており、ソリトンモードロックレーザーとして働く。そのために繰り返し周波数は小さい値となったと考えられる。ソリトンモードロックとして働いていることは、図4 (b)にソリトンモードロックの特徴であるケリーサイドバンドが立っていることから確認できる。

作成した figure-8 は、励起パワーを徐々に大きくしていったとき、励起パワーが 224 mW となった時点で外部から摂動を与えることなくモードロックが働いたことが確認できた。figure-8 は一般にセルフスタートが困難とされ、シードパルスとなる何らかの摂動が必要とされる。そのため、電気光学変調子による強度変調を与えるなどの外部から摂動を与える手法が一般にとられるが、今回作成した figure-8 はその必要がない。セルフスタートの実現の要因のひとつとして、今回使用した EDF の吸収量が 55 dB/m と大きいために過飽和吸収機構のような働きをした可能性が考えられる。

4. EDFA の作成

f_{ceo} を検出するためには、1 オクターブ以上の広がりを持つスーパーコンティニューム(SC)光を得る必要がある。そのために高非線形ファイバー (HNLF) によりスペクトルの拡大を行うが、HNLF での非線形光学効果を強く得られるようにエルビウム添加光ファイバー増幅器(EDFA)によって

光パワーの増幅を行った。作成した EDFA の構成を図 5 に示す。

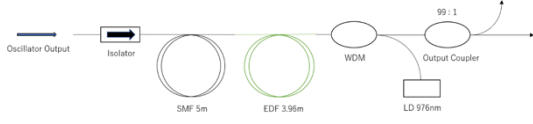


図 5 EDFA の概略図

用いた EDF(ER30-4/125)は吸収量が 1550 nm 帯で 30dB/m、分散量が 14.5 ps²/km、使用した長さは 3.96 m である。EDF の前に融着された SMF はプリチャープ、及び分散補償用として融着した。共振器から出力されたパルスがカプラーを通してピークパワーが下がった状態で SMF を伝搬することで、自己位相変調の効果が小さくなり、パルス幅は広くなる。パルスがピークパワーの小さい状態で EDF に入射されることで EDFA での利得の飽和を防ぐ目的がある。EDFA の増幅特性を図 6 に示す。

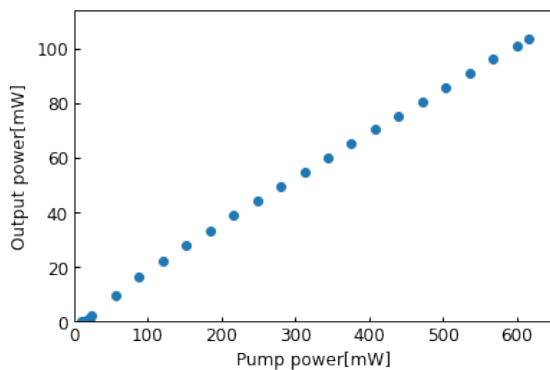


図 6 EDFA の出力特性

増幅後の出力パワーが 70 mW のときの自己相関波形及びスペクトルを図 7、8 に示す

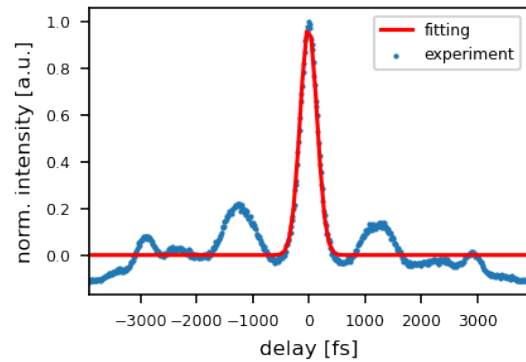
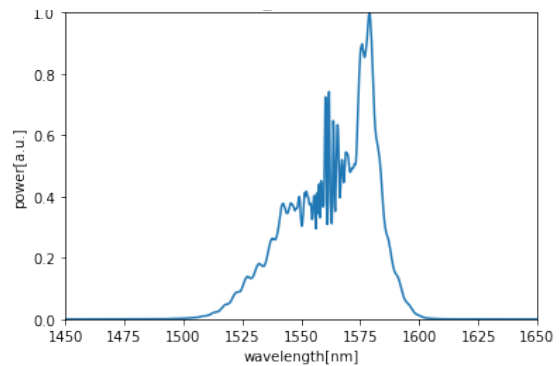
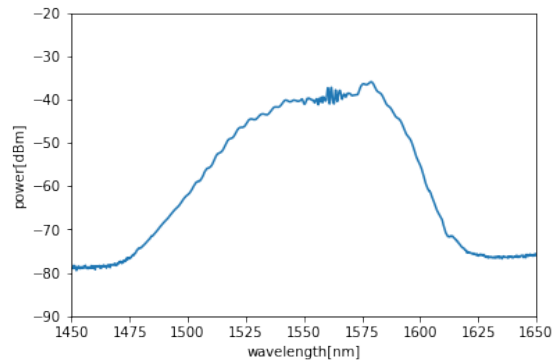


図 7 増幅後の自己相関波形



(a) 増幅後のスペクトル(縦軸線形)



(b) 増幅後のスペクトル(縦軸 Log)

図 8 増幅後の自己相関波形及びスペクトル

パルス波形を sech² 型としてフィッティングを行なったところ、パルス幅は 97.5 fs だった。図から自己相関波形及びスペクトルに構

造が生じてしまっていることが確認できるが、作成した EDFA は SMF が長く、全体として異常分散に偏っているためにパルスの分裂が生じている可能性が考えられる。そのため EDFA の分散補償をすることで改善が期待される。図 8 (a) からよく分かるように、スペクトルの構造のために半値全幅を求めてフーリエ変換限界パルス幅を算出しての評価ができなかったが、出力パワーが最大で 100 mW あること、及びパルス幅 97.5 fs であることから 20 kW 以上のピークパワーがあると計算され、HNLF でのスペクトル拡大を十分に期待できると考えた。実際に HNLF によるスペクトルの拡大を行なった際のスペクトルを図 9 に示す。

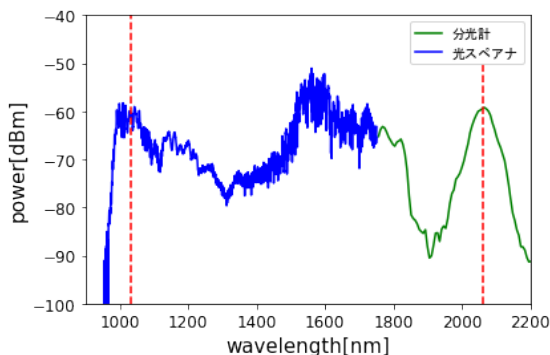


図 9 HNLF 入射後のスペクトル

光スペアナの測定限界のため、1750 nm 以降のスペクトルは分光形によって測定した。上図の赤点線はそれぞれ 1030 nm、2060 nm を示しており、目標としていた 1 オクターブ以上のスペクトル広がりを実現したことが確認できた。

5. まとめと展望

堅牢な光周波数コムの開発のために、全て PMF で構成された異常分散 figure-8 モードロックレーザーを開発した。ソリトンモードロックが正常に働くことを確認し、励起パワーを最適化したときの繰り返し周波数は 34 MHz、スペクトルの半値全幅は 5.53 nm だった。また、この figure-8 はセルフスタートを確認した。このセルフスタートの条件解明が今後の課題となる。さらに、1 オクターブ以上の広帯域な SC 光取得のために EDFA の作成を行なった。増幅後の出力パワーは最大で 100 mW、励起パワーが 70 mW のときのパルス幅は 97.5 fs だった。増幅後の自己相関波形及びスペクトルには構造が確認され、EDFA の分散補償を行うことにより改善が期待される。HNLF によりスペクトルの拡大を行なったところ、1030 nm から 2060 nm までの 1 オクターブ以上の広がりを確認できた。今後は f-2f 干渉計を用いて f_{ceo} の検出を行う。また、長期動作安定性及び雑音特性の検証が今後の展望である。