

令和4年度卒業論文

音響光学素子を用いた高精度測角システムの小型化検討

s1810736 佐藤昂紀

1 研究背景

日本の重力波観測プロジェクト DECIGO (DECIhertz Interferometer Gravitational wave Observatory) は、3 台の衛星を宇宙空間上で編隊飛行を行うことで、重力波観測を行う計画である。衛星は一辺 1000km の正三角形の編隊飛行を行い、正三角形型レーザー干渉計を構築するため、衛星の編隊飛行のための相対位置を把握する必要がある。本研究室での先行研究において、主衛星から出射される角度情報を RF 信号として乗せたレーザービームを相手側衛星が受信することで、主衛星の基準軸からの相対角度を得ることが出来るシステムが考案、実証されている。本システムは衛星搭載を目的としているため、より小型化、独立化を目指したシステム設計を行った。また、先行研究では電源、RF 信号発生器、PC などのシステム周辺機器が多く独立性に欠ける点を克服するため、MCU (Micro Controller Unit) を用いた RF 信号制御システムを考案した。

2 原理

2.1 音響光学素子

衛星による編隊飛行に利用する衛星間の相対位置・姿勢センサとして、音響光学変調子 (AOM: Acousto-Optic Modulator) が注目されている。AOM はその内部に入射したレーザー光を、内部に備える媒質に音響信号 (一般に数十 MHz ~ 数百 MHz の電気信号を圧電素子により音響信号としたもの) を与えることにより、一定の範囲内で任意の回折角度に回折させることのできる光学素子である。この素子の特徴として・レーザー光の偏向を音響信号で変化させるため、可動部が存在しない事・可動部が存在しないため、モーターな

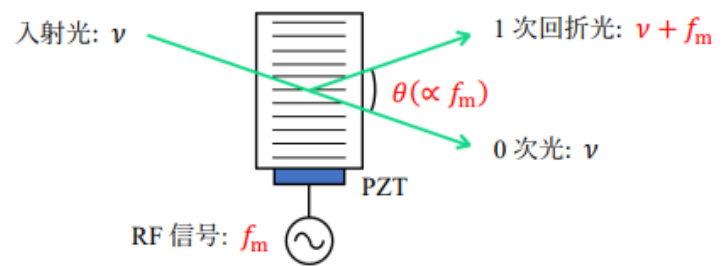


図1 音響光学素子によるブラッグ回折

音響光学素子には、音響光学変調子 (AOM: Acousto-Optic Modulator) と音響光学偏向子 (AOD: Acousto-Optic Deflector) の 2 種類の音響光学素子が存在する。AOD では音波が Shear モードと呼ばれる特殊な進行方法をするため、音速が大幅に低下する。回折角 θ は 1 で与えられる。

$$\theta = \frac{\lambda f_m}{v} \quad (1)$$

AOD では音速の低下が v の低下を示すため、上式に示す通り大きな回折角を得ることが出来る。対して AOM は光の強度変調に特化しており、帯域や得られる回折角は AOD に比べて小さい。

3 実験

3.1 小型可搬化

現在までに確立されている 2 軸掃引型光学系を踏襲し、可搬化のため 450mm×600mm の BBM として構成する。本システムは衛星搭載を目標として設計されているため、小型、軽量であることが重要である。先行研究において 2 次元掃引を行う光学系が実現されているため、それを素に 450 × 600mm のブレッドボード上に収まる形で光学系を設計した。以下に本研究において設計した光学系の概観を載せる。

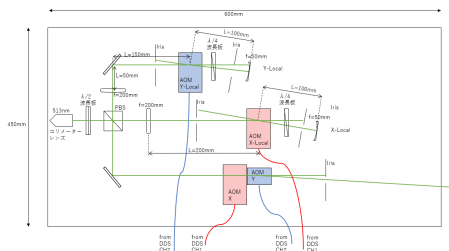


図2 2軸測角システム

光学系を設計するにあたり、最も重要なことはビームのモードマッチングである。特にローカルパスにおいて、凹面鏡でビームの波面と鏡の球面を一致させて反射させるために、AOMへ光を絞り込んで入射させる。この際、ビームを絞り凹面鏡商店からの焦点からのずれを出来る限り少なくする必要があるが、ビームを絞りすぎると回折モードが崩れてしまうことが先行研究から分かっている。およそ $45\mu\text{m}$ 以上のビーム径があればモードが崩れないことが分かっている。そのためには細いビームを焦点距離の比較的長いレンズで緩やかに絞り込む必要がある。光学系 AOM 前段に $f = 200\text{mm}$ のレンズを用いてこの設計を行ったため、このダブルパスの部分長くなってしまっている。また光源出射直後のエキスパンダーは、完全にコリメートはせず、ビームウエストの位置に PBS が来るように調整している。先行研究において存在した偏光ビームスプリッタ (PBS:Polarizing Beam Splitter) 前方のビームエキスパンダーの必要性についてビーム径シミュレーションによって再考した。図3にビームエキスパンダーの存在する場合を、図4にビームエキスパンダーが存在しない場合を示す。

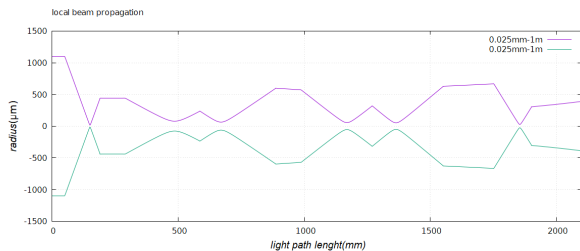


図3 先行研究の光学系によるビーム径シミュレーション

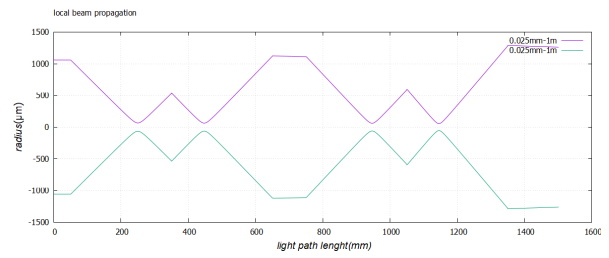


図4 本研究の光学系によるビーム径シミュレーション

エキスパンダを持つ光学系の場合、ローカルパスを伝搬中にガウシアンビームの広がりによるシグナル光とのビーム径の差が発生するため、ビート信号におけるパワーにロスが発生する。対してビームエキスパンダを持たない系の場合、ローカルパス伝搬中のビーム広がりが少なく、シグナル光とビーム径が一致し、パワーのロスが少なくなる。また、エキスパンダを挟まないため光学素子点数が減り、光学系をその分小さくすることが可能である。本実験では小型化のためエキスパンダを持たない系を採用した。

小型可搬化を目的としつつ、測角システムを独立して稼働できるように、MCUを用いた AOM を開発した。図5に現在の制御システムを示す。

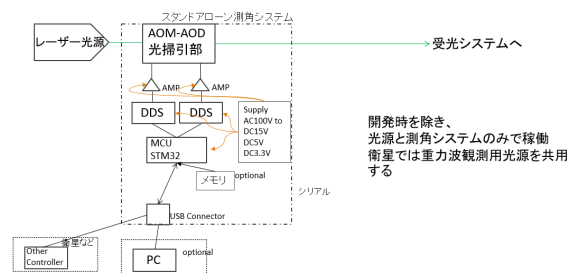


図5 本研究における測角制御システムを

本システム特徴を以下に整理する。

- 可搬性向上
- 外部システム削減 (DAQ, 制御システム, PC 等)
- 衛星搭載に向けたモジュラー化

3.1.1 MCU

本研究に用いた MCU は STM32F722ZE である。本 MCU を利用するにあたり開発用ボードである NUCLEOF722ZE を用いた。MCU の選定条件として、以下が挙げられる

- 掃引中に DDS と常時高周波の通信が必要であるため、高速に動作する GPIO が必要
- DDS 制御処理以外の処理を行えるよう、高速の処理が可能
- MCU として汎用で、開発の行いやすいもの

利用した STM32F722ZE は STM シリーズ中ハイエンドモデルに相当するもので、CPU クロック速度は 216MHz と比較的高速であり、高速動作する GPIO を備えている。また、多数の組み込み製品内で利用されているため汎用性が高い事も特徴である。NUCLEOF722ZE は STM32F722ZE を搭載した開発ボードであり、STMicro 製 MCU の書き込み装置 STLink を開発ボード内に備えるため、開発が行いやすいことも特徴である。利用した開発環境は STMicro から提供されている STM32CubeIDE である。DDS の周波数制御用信号は 5V であるのに対し、STM32 の制御信号は 3.3V で駆動するため、DDS と MCU の制御線の間レベル変換回路 [TXS0108E] を挟み利用した。

図 5 に示すように DDS 駆動、電源装置、MCU をまとめた装置を構成し、実際に DDS から RF 信号が射出できるかを確認する。本 DDS にはシリアル通信モードとパラレル通信モードが存在している。シリアル通信モードでは 40bit の信号を 1 つの信号線で送る使用上、1 つの制御信号を送るまでの時間がかかる反面、制御が簡便である。パラレル通信は 8bit の信号を 5 回に分けて通信する仕様であるため、通信が高速となっている。今回は DDS の制御が実際に行えるのかを確認するため、シリアル通信モードで運用している。図?? に示すように DDS の制御信号は D1,D2,FQ,RST,CLK を用いる。図 6 に DDS 制御システムのブロック図を示す。

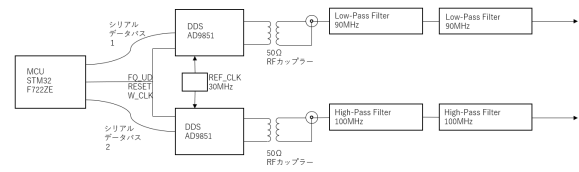


図 6 DDS 制御システムのブロック図

3.2 制御プログラム

ビーム掃引の際の掃引速度をコントロールするため、MCU のタイマーによる割り込みを用いて時間制御を行う。タイマー割り込みを用いる事で、時間制御における CPU 待ち時間を別の処理に用いることが出来るため、今後の利便性向上に役立つことが期待される。DDS に送る周波数設定値 W_{freq} は、基準周波数 f_{REF_CLK} と出力周波数 f_{OUT} とすると、

$$W_{freq} = (2^{32} \div (f_{REF_CLK} \times 6)) \times f_{OUT} \quad (2)$$

ここで、 $f_{REF_CLK} = 30MHz$ であるため、 f_{OUT} から一意に値が定まる。式 3 は簡単に、

$$W_{freq} = 23.86092942 \times f_{OUT} \quad (3)$$

と表せる。

3.2.1 プログラム動作

プログラムを実行した際の DDS との通信状態をオシロスコープで確認し、通信波形の様子、1bit の通信にかかる時間 Δt_{bit} 、1 回の通信 (40bit) にかかる時間 Δt_{Serial} 、最短通信間隔 Δt_{Sweep} を確認した。

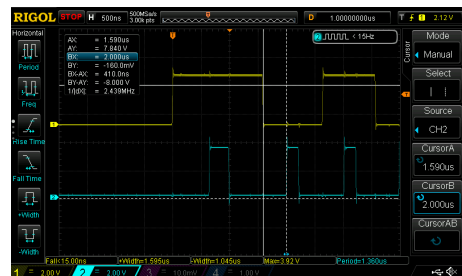


図 7 1bit 通信

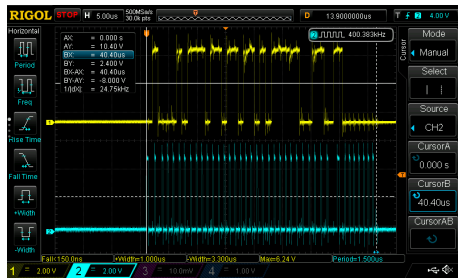


図 8 40bit 通信

図 7 からシリアル通信時の 1bit にかかる時間 $\Delta t_{Serial} = 410[ns]$, 図 8 から 1 サイクルにかかる時間 $\Delta t_{Serial} = 40.4[\mu s]$ である事が分かる. 図 9 は TIM5 の割り込み間隔を短くしていき, シリアル通信が間に合う際の最短通信間隔 Δt_{Sweep} が示されている.

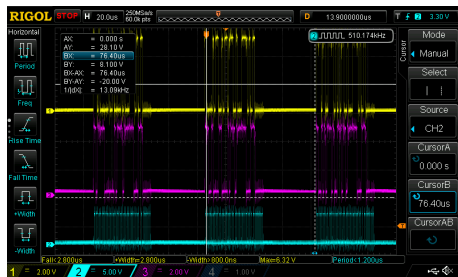


図 9 シリアル通信が間に合う最短通信間隔

最短通信間隔 $\Delta t_{Sweep} = 76.4[\mu s]$ であった. ここで, 最短通信間隔はシリアル通信がデータの欠損無く通信できる間隔を示しており, これ以上の速度で掃引することは可能である. その場合, シリアル通信と通信の間に飛ばされる値が存在し, 角度分解能が減少することが予測される. 角度分解能は別途検証の余地を残すものである.

4 まとめ

音響光学素子の小型化検討として, 衛星間相対測位システムの小型軽量化と可搬化を行った. 本システムは最終的に衛星に搭載されるものであるため, 軽量化と小型化によるコストの削減効果は非常に大きなものとなるため, 重要な達成目標となる. 小型軽量化に当たり, 光学系の信頼性を担保するためにも 450

× 600mm のブレッドボードを用いて構成した. また可搬化達成と実験における利便性向上を目的とした MCU による制御システムを構成し, DDS による RF 周波数掃引が行われていることを確認し, 通信間隔を確認した.

4.1 今後の展望

本研究では小型可搬化した測角システムを構成し, 実際に DDS からの RF 信号を確認できた. 先行研究で行われているシステムの評価が現状行えていないため, 今後評価実験を行いたい. 現在の実験環境では, 実験装置の振動や空気の攪拌による影響により長距離測定の精度悪化(どの程度影響があるかは評価を要する)を招いてしまう. そのため, 精度よく長距離の測定を行うため, 外乱が少なく反射なしに長い基線長を確保できる TAMA300 の真空パイプを利用した実験を今後行いたい.

参考文献

- [1] 赤見恵 “音響光学偏向子を用いた人工衛星位置決定システム” 電気通信大学, Mar. 7, 2019
- [2] 田尻 美佳 “音響光学素子を用いた精密測角による衛星間長距離相対測位” 電気通信大学, Apr. 4, 2019
- [3] 鈴木聡宏 “音響光学偏向子を利用した編隊飛行衛星間の相対位置計測・制御手法に関する研究” 東京大学, Dec. 1,
- [4] 鈴木聡宏 “AOD の数値モデル化およびそれを利用した計測・制御手法検討” 東京大学, Jan. 08, 2021
- [5] 重力波プロジェクト推進室, ”DECIGO”, 重力波プロジェクト推進室, <http://tamago.mtk.nao.ac.jp/spacetime/decigo.j.html>.