

# AOM を用いた衛星間測距システムの開発

武者研究室 長谷川 丈紘

2022 年 3 月 4 日

## 1 研究背景

日本で進められている重力波検出計画の 1 つとして、DECIGO 計画が挙げられる。DECIGO では 0.1~10Hz の低周波域の重力波をターゲットとしており、3 台の人工衛星を 1 辺 1000km の正三角形の頂点にできるように編隊飛行させて、各衛星間でファブリーペロー・マイケルソン干渉計を構築し、重力波を観測する。マイケルソン干渉計を構築するにあたり、各衛星の相対位置の測定が必要となる。角度の測定システムに関してはすでに本研究室で開発済みである。しかし、角度だけでは位置の測定として不十分であり、絶対長の測定が必要となる。また DECIGO に搭載するに伴って、1000 km に対して 10 m 以下の精度と機械的な駆動部のない測定系が求められている。

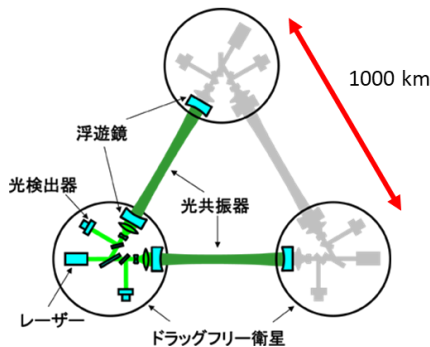


図 1 : DECIGO の概略図

## 2 絶対長測定の原理

ある長さを波が伝搬した場合、波の数と波長の積によって長さを表すことができる。しかし波の数を直接数えることは困難である。そこで周波数の異なる 2 種類の波を考

え、波の数の差と周波数の関係から絶対長を計算する。2 つの波には

$$N_1 - N_2 = (f_1 - f_2) \times \frac{v}{L} \quad \dots (1)$$

という関係式が成り立つため、2 つの周波数間で周波数掃引を行い、位相変化の波の振動回数を数えることで絶対長を計算できる。波の数のカウント誤差を  $\pm 0.5$  回とした場合、分解能は

$$\Delta L = \frac{0.5 \times v}{(f_1 - f_2)} \quad \dots (2)$$

と表すことができ、分解能が測定する距離によらず掃引する周波数の幅によって決まるため、長距離の測定に向いていると言える。DECIGO の要求精度を達成するためには、周波数の掃引幅が少なくとも 15 MHz 以上必要となる。

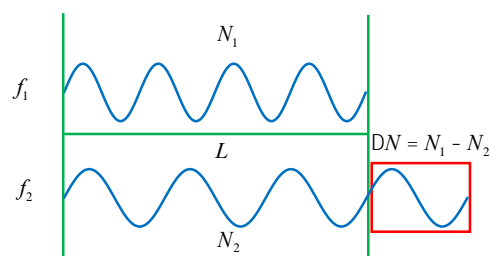


図 2 : 絶対長測定の原理

次に本研究室で開発している絶対長測定システムを図 3 に示す。

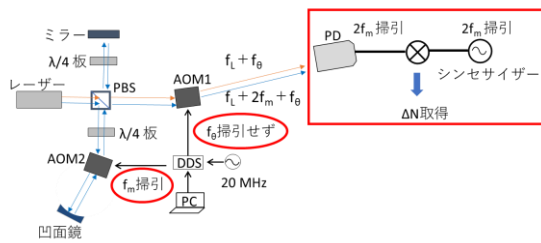


図 3：衛星間位置測定システム

この系は本研究室で開発した角度測定システムに、絶対長測定の系を組み込んだ系である。

角度を測定する際には、AOM1 のみを通過するシグナル光と、AOM1 と 2 どちらも通過するローカル光の 2 種類の光を同軸で出射し、2 つの AOM によって周波数掃引を行うことで空間掃引を行う。フォトディテクターによって受光し、周波数カウンタによってビート周波数を計測することで角度情報を取得する。

絶対長を測定する場合は、AOM1 のみで掃引を行い、フォトディテクターで受光するビート周波数を角度のポインティングを変えずに掃引する。受光後、周波数掃引と同期復調することでビート信号の位相の変化の波を観測し、振動回数から絶対長を計算する。使用する AOD は 50 MHz まで掃引幅を取ることが可能であり、また機械的な駆動部もない系となっているため、DECIGO 搭載の要求を満たすような測定系となっている。

### 3 実験

#### 3.1 レーザーによる実証実験

レーザーを用いて実証実験をするために図 4 のような系を構築した。

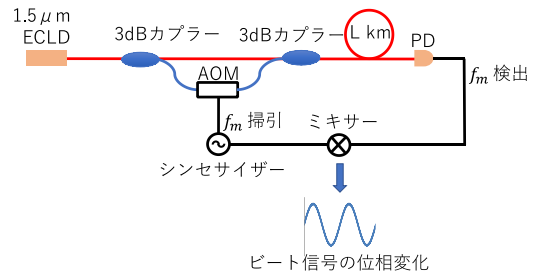


図 4：レーザーを用いた実証実験系

実験室内では空間系で長距離を確保できないため、ファイバーを用いて実験を行なった。レーザーから出た光を 3dB カプラーによって 2 つに分け、片方のみ AOM によって周波数をシフトさせてから合波した。その後 1 km、4.46 km、25 km の長距離ファイバーを組み合わせた距離を伝送させてからフォトディテクターで受光し、ビート信号を得た。AOM に印加している信号でビート信号を復調することで、位相変化を得ることができるため、シンセサイザーによって周波数を掃引し、位相変化の振動回数を取得することで絶対長を計算できる。まずは周波数掃引幅を小さく取り、出てきた波の数を目視によってカウントした。実際に観測した位相変化の例を図 4 に示す。

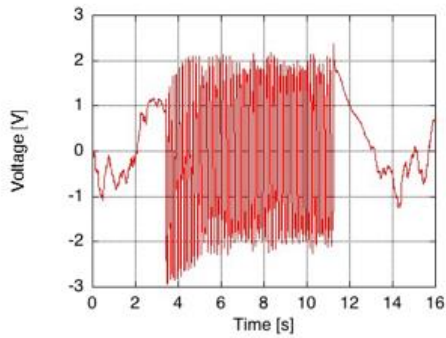


図 5 : 信号波形の例 (L=25 km)

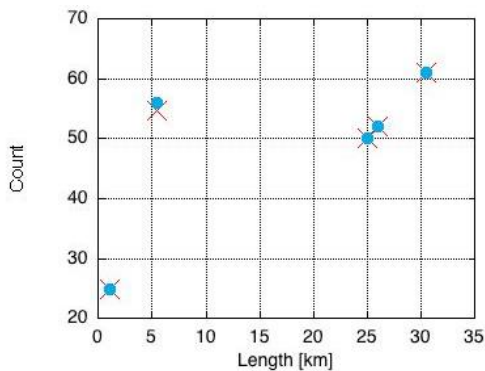


図 6 : 目視および計算で予測した振動回数

図 6 は目視および計算で予測した振動回数になっており、青いプロットが目視によるカウント、赤いプロットが計算によるものになっており、目視でのカウント結果が計算によって予想したカウント数とほぼ一致したため、振動回数を正しく得られていると考えた。周波数掃引幅をより広く取ること、分解能の向上振動が見込めるが回数が増えるため、目視ではなく振動回数をミスなく数えられる方法を考えた。

### 3.2 カウント方式

より多くの復調位相の振動回数を計るため、ヒステリシスコンパレータを用いて、いくつの波が出てくるのか直接カウントを

行なった。以降この方法をカウント方式と呼ぶ。図 3 の実験系を用いて、長距離光ファイバーを 25 km に固定し、周波数掃引幅を 2 MHz~12 MHz で変えながら各周波数掃引幅で 10 回ずつ長距離ファイバーの長さ測定を行なった。

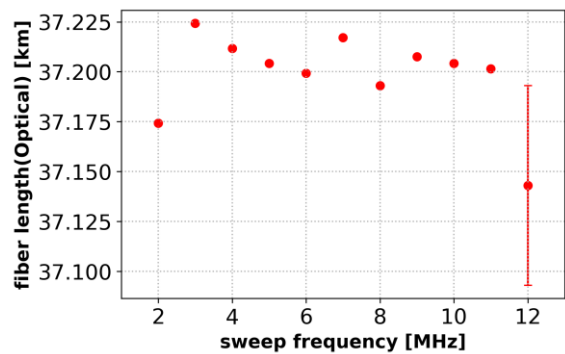


図 7 : カウント方式における周波数掃引幅と測定したファイバーの光学長

図 7 の横軸は使用した周波数掃引幅、縦軸はファイバーの光学長測定結果を示しており、エラーバーは 10 回測定をした際のばらつきを示している。掃引幅 11 MHz までは周波数を拡張してもカウントはずれることなく、1/2 刻みでのカウントから分解能 13.64 m 達成した。しかし 12 MHz でのカウントは本来よりも少なくなってしまう。これは AOM の回折効率の問題であり、必要な SN 比を稼ぐ事ができなかったためである。実際に使用する予定の音響光学素子は 50 MHz の周波数掃引幅を確保可能であり、掃引幅を 15 MHz まで広げることで分解能 10 m の達成を見込んでいる。

### 3.3 FFT 方式

FFT 方式は、周波数掃引が時間に対して線形であると仮定した場合に、復調位相が決まった周波数で振動することを利用したカウント方法である。得られた信号の波を高速フーリエ変換して周波数を決定したのちに、周波数掃引にかかった時間との掛け算から波の数を計算によって求める方法である。図 3 の実験系を用いてカウント方式と同様に FFT 方式でも 25 km ファイバーの光学長測定を行なった。

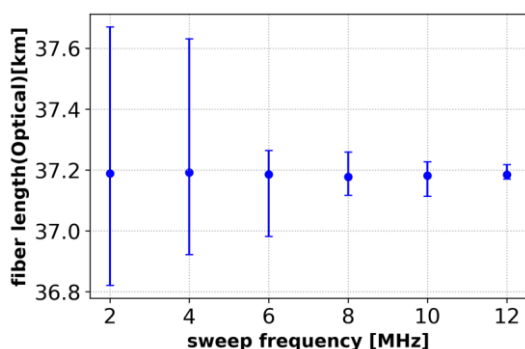


図 8 : FFT 方式における周波数掃引幅と測定したファイバーの光学長

図 8 は FFT 方式におけるファイバーの光学長測定結果であり、プロットは 10 回測定した平均値、エラーバーは測定のばらつきを示している。FFT 方式では、周波数掃引幅 12 MHz でばらつきが  $\pm 13$  m 程度と大きくなってしまった。これは振動回数に換算すると  $\pm 1$  カウント分に相当する。今回使用した DDS による周波数掃引は時間に再現性があり、約 16 s 程度の掃引時間に対し、100  $\mu$ s の分解能であらかじめ測定を行なった。また周波数決定には FPGA を用

いて信号取得して高速フーリエ変換

(FFT) をしており、周波数決定の精度は FPGA によるサンプリング数とサンプリング時間で決まる。今回は 0.06 Hz の精度であり、時間測定に対して粗い測定であったため、より多くのサンプリング数や長い測定時間を取ることで周波数決定の精度が上がり、ばらつきの少ない測定が可能であると考えている。しかし、FFT 方式はそもそも原理的にカウント方式よりも高精度な測定ができないため、精度を求めるにはカウント方式の方が向いている。

### 3.4 必要な SN 比の検討

次に宇宙空間で 1000 km 光を飛ばして信号を取得することを考え、カウント方式、FFT 方式に必要な SN 比の測定を行なった。図 3 の実験系で AOM に印加する掃引信号と、PD 後の電気アンプによってビート信号のパワーを持ち上げた状態で PD 入射前に 3 dB カプラー等を挿入し、光量を下げていくことで SN 比を変化させて信号を取得し、カウントが出来る SN 比を見積もった。

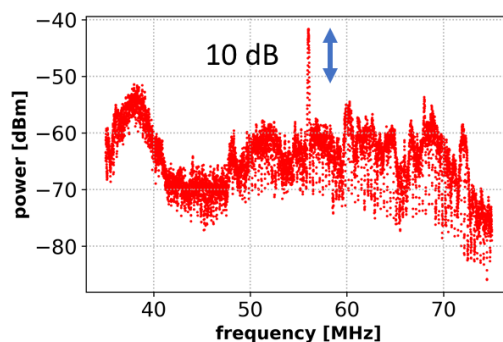


図 9 : ビート信号の例 1

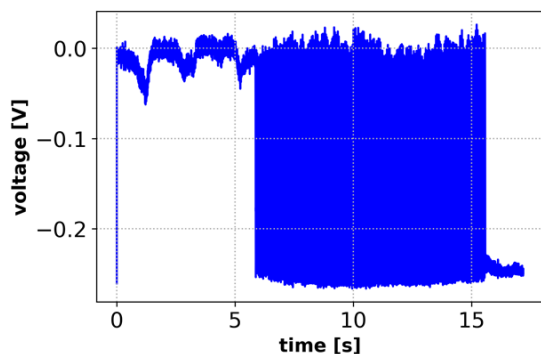


図 10 : 図 9 のビート信号から得た位相変化

SN 比を下げた時の 1 つの例を図 9 に示す。この時のビート信号の SN 比は約 10 dB であり、図 10 はこの時の位相変化を表している。SN 比 10 dB の時ははっきりとした波形を得られており、カウント方式、FFT 方式の両方で測長を行なうことができた。

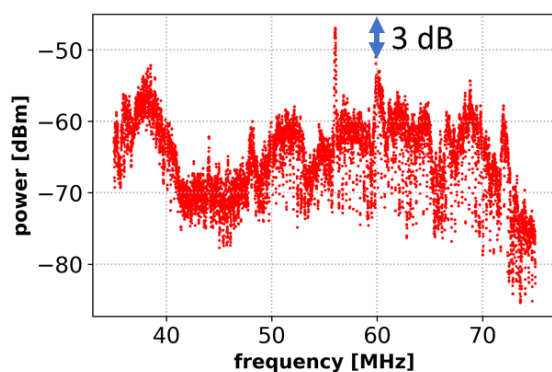


図 11 : ビート信号の例 2

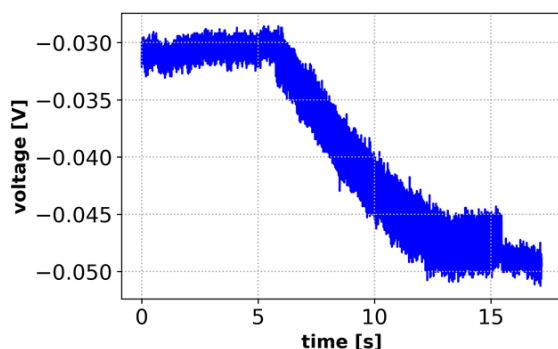


図 12 : 図 11 のビート信号から得た位相変化

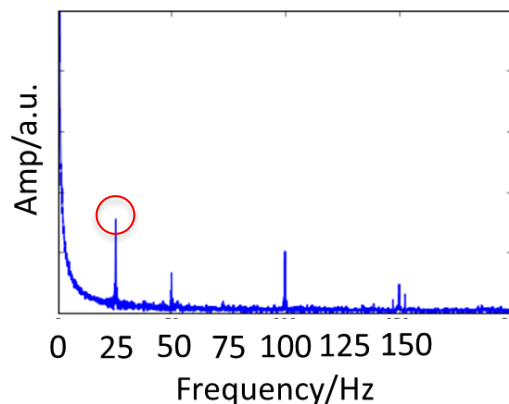


図 13 : 図 12 の信号を FFT した結果

図 11 のように SN 比を 3 dB まで落とした時、位相変化は図 12 のようになり、カウント方式では、閾値を設けても信号の端から端まで正しくカウントをすることができなかつた。よってカウント方式における必要な SN 比を 10 dB と見積もった。カウント方式ではフィルター等を用いてビート信号以外の雑音を落とし、SN 比を確保することで、波形を崩さないことが重要である。

FFT 方式では図 13 から分かる通り、フーリエ変換によって信号の周波数を見つける事ができ、カウント方式よりも低い SN 比でも測長可能であることが実証できた。またフーリエ変換した際に出てくる周波数成分はある程度予測することができるため、より低い SN 比でも測定ができる可能性もある。

#### 4 まとめと展望

本研究ではレーザーを用いて絶対長測定の原理実証を行なった。2 つの光のビート

信号を周波数掃引し、同期復調することでビート信号の位相変化を取得でき、位相変化の振動回数を数えることで絶対長を測定する。現在、振動回数のカウント方法として、閾値を設けて直接回数を数えるカウント方式と、信号の持つ周波数と掃引時間の積で波の数を計算する FFT 方式の2種類の方法を用いている。カウント方法、FFT 方式にはそれぞれメリット、デメリットがあり、カウント方式は振動回数の位相まで読むことができるため高分解能であり、掃引の精度に左右されないが、強度の揺らぎに弱く、またカウントが出来る程度の SN 比が必要となる。FFT 方式は信号の強度揺らぎに強く、SN 比が低くても測定できる反面、時間の測定と高い掃引の精度が必要になる。今回の実験では、カウント方式、FFT 方式における分解能の向上、ばらつきの評価、必要な SN 比の検討を行なった。

カウント方式では周波数掃引幅 11 MHz において複数回測定してもばらつきが生じず、分解能 13.64 m を達成した。また受光パワーを下げていくことでビート信号の SN 比を下げていくことで見積もり、10 dB の SN 比が必要であった。

FFT 方式では周波数掃引幅 12 MHz において±13 m 程度のばらつきが見られた。これは振動回数にすると±1 カウント分に相当し、カウント方式に比べて 1/4 程度であった。しかしカウント方式に比べて低い SN 比でも測長可能であることが実証できた。カウント方式を微長、FFT 方式を粗長として使用することで、より早く正確な測定が

可能であると考えている。

今後の展望として、まずは掃引幅のさらなる拡張により目標精度 10 m の達成や空間系での実証、同期復調システムの構築などを行なっていく。

## 5 参考文献

- [1] 赤見恵 (2016) 卒業論文 「音響光学素子を用いた衛星捕捉システムの基礎開発」
- [2] 赤見恵 (2018) 修士論文 「音響光学偏向子を用いた人工衛星位置決定システム」
- [3] 田尻美佳 (2020) 卒業論文 「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」
- [4] Guang Shi, Kefei Hei, Wen Wang, Nandini Bhattacharya “Frequency-modulated continuous-wave laser distance measurement system using Fabry-Perot cavity as measuring reference“ Physics arXiv: 1901.01131 Submitted on 2 Jan 2019