

音響光学偏向子を用いた絶対長測定システムの開発

武者研究室 長谷川 丈紘

2020年3月6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、1000kmに対して10m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。

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

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

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、波の数の差を位相変化の波の数として数えることで絶対長を計算できる。この絶対長測定の精度は測

定する距離に依存せず、波の数のカウント誤差を±1回とした場合、掃引する周波数の幅が測定精度となる。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30MHz以上必要となる。

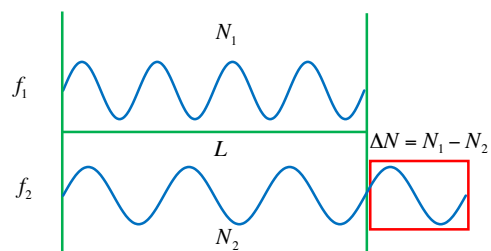


図1 絶対長測定の原理

本研究室で開発している絶対長測定システムを図2に示す。

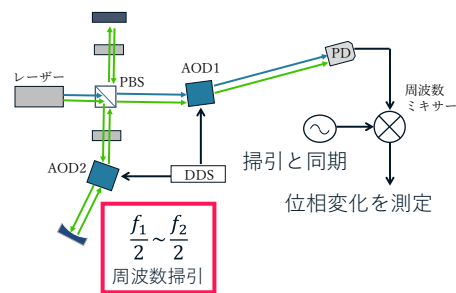


図2 衛星間位置測定システム

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、AOD1のみを通過する信号光と、AOD1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AOD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、AOD1 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、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、波の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 3 のような系を構築した。

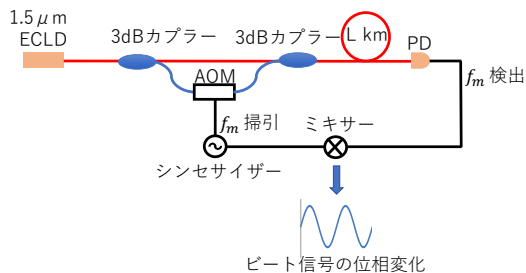


図 3 レーザーを用いた実証実験系

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、ビート信号の位相情報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、ビート信号の位相変化を波として取得することができ、波の数から絶対長を計算できる。出てきた波の数を目視、および立ち上がりカウンタによってカウントした。実際に観測した位相変化の波を図 4 に示す。

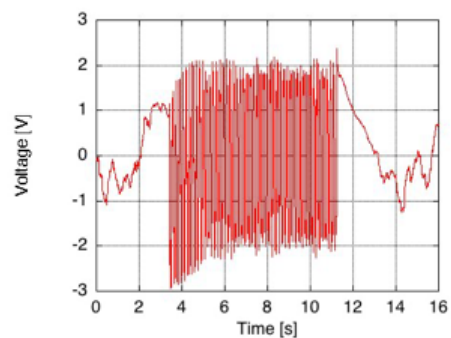


図 4 信号波形の例 (L=25 km、波の数 50)

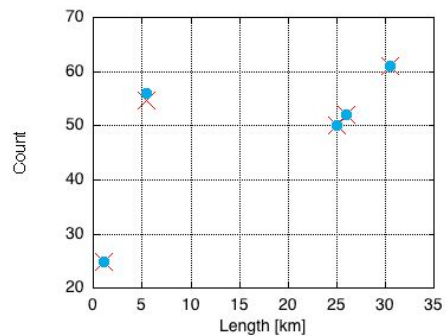


図 5 目視および計算で予測した波の数

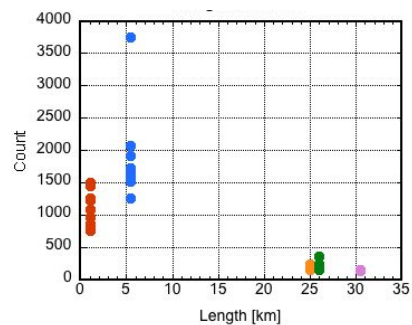


図 6 カウンタでカウントした波の数

目視によるカウント結果は計算によって予想したカウント数とほぼ一致したが、カウンタによるカウントでは1桁以上カウント数が離れてしまった。そこでカウンタを用いない方法で波の数のカウントを行なった。

3.2 スペクトルを用いたカウント

カウンタを用いないカウント方法として、スペクトルを用いた方法（以下スペクトル方式）によって波の数を取得した。この方法は位相変化の波をフーリエ変換し、スペクトルによって信号の持つ最も大きな周波数成分と、掃引時間との積で波の数を決定する。この方法はカウンタに比べて強度の変化に強いため、SN比が多少悪くても波の数を得ることができる。図3の系を用いて、長距離ファイバーの長さを25 kmに固定して、掃引周波数の幅を変えながら波の数のカウントを行なった。

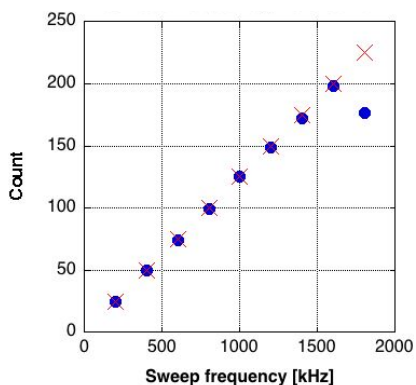


図7 スペクトル方式で得られた波の数

図7に示した通り、予測していたカウント数とほぼ一致するカウント結果が得られた。しかし、使用していた市販のシンセサイザーでは掃引ステップ数に限界があり、1600

kHz以上の掃引では信号波形を生成することができなかつた。絶対長測定の精度は掃引する周波数幅を大きくすることで向上するため、手製のDDS (Digital Direct Synthesizer) を使用して掃引幅の拡張を行なった。

3.3 周波数掃引幅の拡張

DDSを用いて周波数掃引幅を2~8 MHzの間で変えながら位相変化の波のカウントを行なった。カウント方法は、スペクトル方式と、ADコンバーターとカウンタによる方法（以下ADコン+カウンタ方式）の2種類を用いた。ADコン+カウンタ方式は電圧の切り替わりをカウントして最後に半分にするカウント方法である。1つの周波数ごとに10回測定を行い、カウント数のばらつきの評価を行なった。

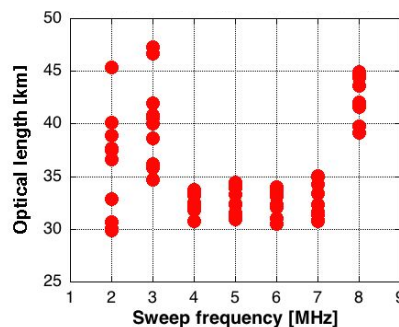


図8 スペクトル方式の測定値のばらつき

図8にスペクトル方式での測定結果を示す。スペクトル方式では10回の測定で大きく結果がばらついてしまった。考えられる理由としては、DDSの掃引が一定速度で掃引されておらず、信号の周波数の決定精度が落ちてしまったことが挙げられる。そこで

DDS の掃引の精度をまずは上げる必要がある。

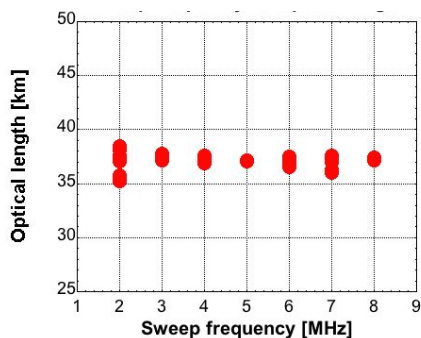


図 9 AD コン+カウンタ方式の測定値のばらつき

図 9 に AD コン+カウンタ方式での測定結果を示す。AD コン+カウンタ方式でも、スペクトル方式よりは大きくないが、10回の測定に対してばらつきが生じた。この方式は DDS の掃引の精度に左右されないため、ばらついた理由としては、使用していたコンパレータやカウンタ等の動作が、信号の強度揺らぎに対応しきれていないことが考えられる。電気信号部分の動作確認と信号の雑音の低減によってばらつきを無くすることが今後の課題である。

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波として観測でき、位相変化の波を数えることで絶対長を計算する。現在、波のカウント方法として、信号の持つ周波数と掃引時間の積で波の数を計算するスペクトル方式と、電圧の切り替

わりをカウントして最後に半分にする AD コン+カウンタ方式の2種類の方法を用いている。カウント方法にはそれぞれメリット、デメリットがあり、スペクトル方式は信号の強度揺らぎに強く、掃引ステップ数が比較的少なく済む反面、時間の測定と高い掃引の精度が必要になる。AD コン+カウンタ方式は掃引の精度に左右されないが、強度の揺らぎに弱く、ステップ数も多く取らなければならない。今回の実験では周波数掃引幅の拡張に伴い、同じ条件で複数回測定した場合、結果にばらつきが出ってしまった。まずはばらつきを無くすために、スペクトル方式では DDS の掃引精度の向上、AD コン+カウンタ方式では信号取得の見直しおよび雑音の低減を行なっていく。カウントのばらつきが解消された後に、掃引幅のさらなる拡張や空間系での実証、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] 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