

# やさしいレーザー干渉計

## Basics of Laser Interferometer

川村 静児

S. Kawamura

国立天文台, National Astronomical Observatory of Japan

Email: seiji.kawamura@nao.ac.jp

### Abstract:

Laser interferometers will be used to measure the distance between two satellites in the future gravity mission such as GRACE follow-on. Generally a Michelson laser interferometer can be operated with the mid-fringe locking using the differential signal extraction method to remove the effect of the laser intensity noise, and with the equal arm lengths to remove that of the laser frequency noise. In the satellite gravity mission, however, implementation of the mid-fringe locking is not straightforward because of the large relative velocity of the satellites, and moreover one of the arms in the interferometer is much longer than the other. Solutions to these difficulties are that the mid-fringe locking can be realized using acousto-optic modulators even with the large relative velocity, and that the laser frequency should be stabilized to accommodate the large difference of the arm lengths.

### 1. マイクエルソン・レーザー干渉計の原理

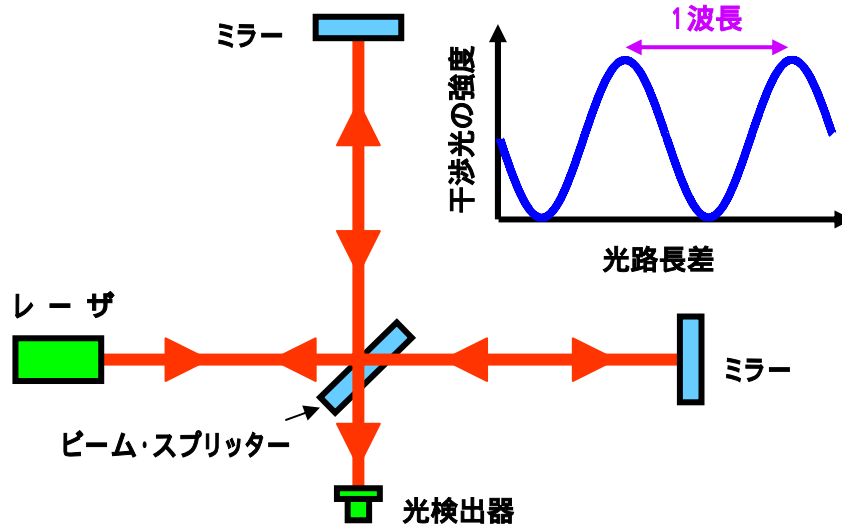


図 1. マイクエルソン・レーザー干渉計

マイケルソン・レーザー干渉計の概念図を図1に示す。レーザーから出た光はビーム・スプリッターで2つのビームに分けられ、それぞれ遠方のミラーにより反射され、再びビーム・スプリッターで再結合し干渉する。干渉光の強度は光路長差が1波長変わるたびに明暗を繰り返す。この際、図2に示すようにミッド・フリンジ付近において、光路長差の変化に対する干渉光の強度の変化が最大になる。

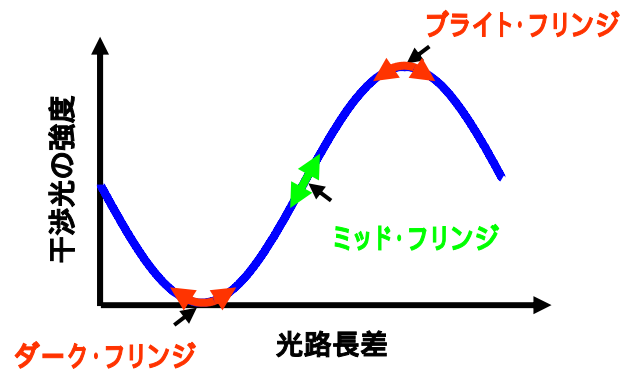


図2. 干渉計のフリンジ

そこで図3に示すように、干渉計が常にミッド・フリンジで動作するように制御する。光検出器の信号から、ミッド・フリンジの光強度に対応するオフセットを差し引き、エラー信号を作る。このエラー信号はミッド・フリンジでゼロとなり、そのまわりでミッド・フリンジからのずれにリニアな信号を与える。エラー信号を適当なフィルター・アンプを通してミラーの位置のアクチュエーターにフィードバックすることにより、干渉計を常にミッドフリンジに保つことができる。そしてこのフィードバック信号をモニターすることにより光路長の変化が検出できる。

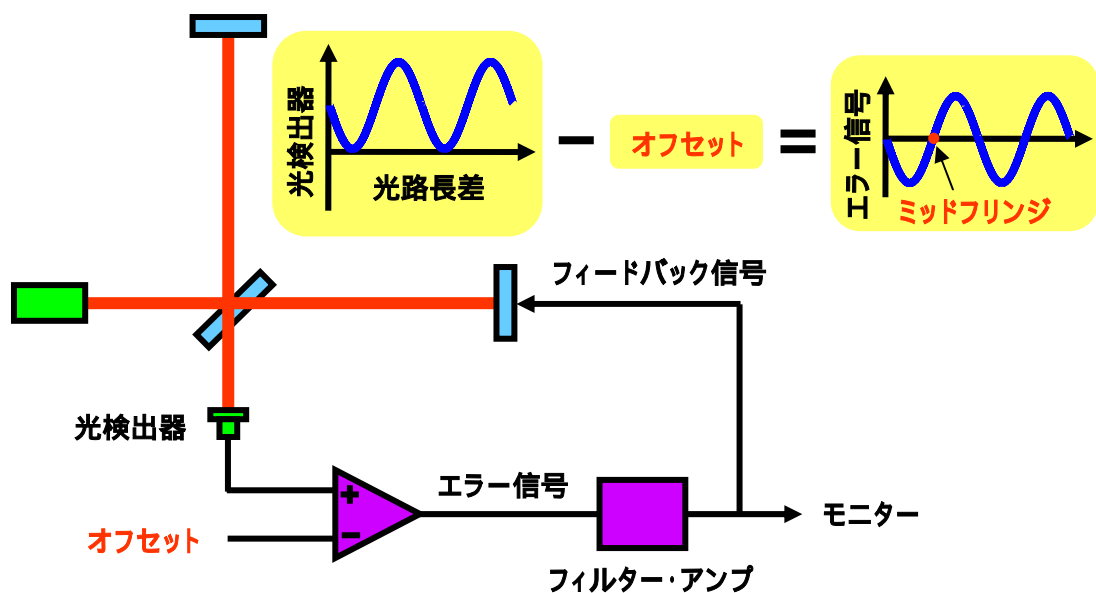


図3. 干渉計のミッド・フリンジへの制御

ところがレーザー光の強度が変化するとミッド・フリンジの光の強度が変化し、エラー信号も変化する。したがってレーザー光の強度雑音は干渉計の雑音となる。これを防ぐ方法が、図4に示したミッド・フリンジ差動法である。レーザー側に帰る干渉光をサーキュレーターで光検出器2に導き、光検出器1の出力との差を取り、それをエラー信号とする。これだとレーザー光の強度が変化しても2つの信号は同様に変わるので、エラー信号は依然としてミッド・フリンジにおいてはゼロとなる。したがってミッド・フリンジで動作させているかぎり、レーザー光の強度雑音は干渉計の雑音とならない。

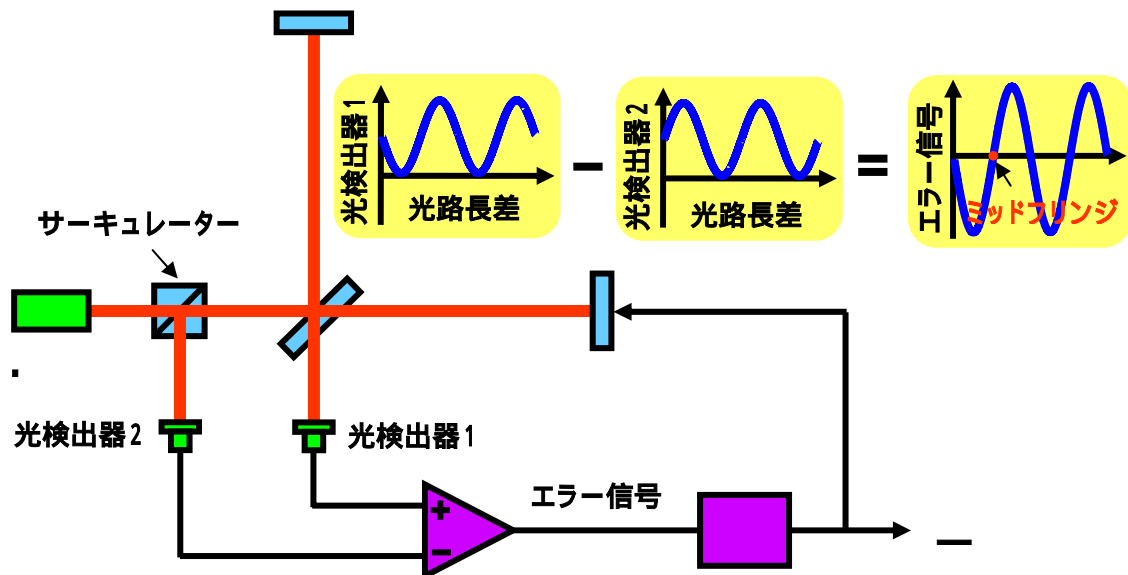


図4. ミッド・フリンジ差動法

レーザー光の周波数雑音の影響は、マイケルソン干渉計の両腕の長さが正確に等しいと消える。理由は図5に示すように干渉光を構成する2つの光が同時にレーザーを出射したものであるため、常に干渉光のフリンジが一定であるからである。

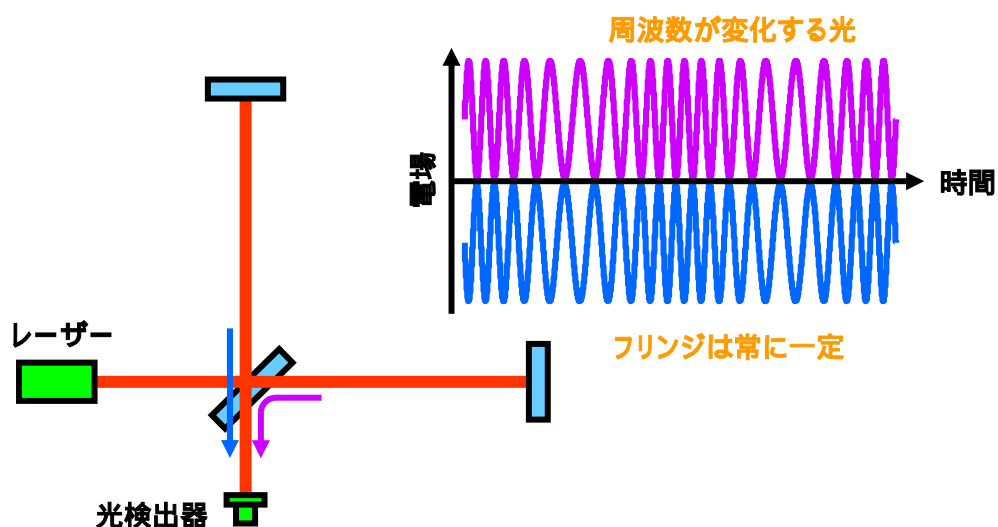


図5. 腕の長さが等しいマイケルソン干渉計における周波数雑音の影響

したがってマイケルソン干渉計を

(1) ミッド・フリンジに差動法で制御し、

(2) 両腕の光路長を等しくする

ことによってレーザーの強度雑音と周波数雑音の影響を取り去ることができる。

## 2. 衛星間測位の問題点とその対策

実際の衛星間測位においても図6に示すように基本的にはマイケルソン干渉計が使われるが、前節で述べた理想的な干渉計と比べて2つの問題点がある。それは、

(1) 2つの衛星が大きな相対速度をもつ ( $\sim 10\text{cm/s}$ )

(2) 両腕の光路長差が大きい ( $\sim 100\text{km}$ )

ことである。(1)のため、ミラーの位置を動かすことによりミッド・フリンジに制御することは不可能であり、また(2)によって、レーザーの周波数雑音の影響も現れてしまう。以下、これらの問題点に対する対策を述べる。

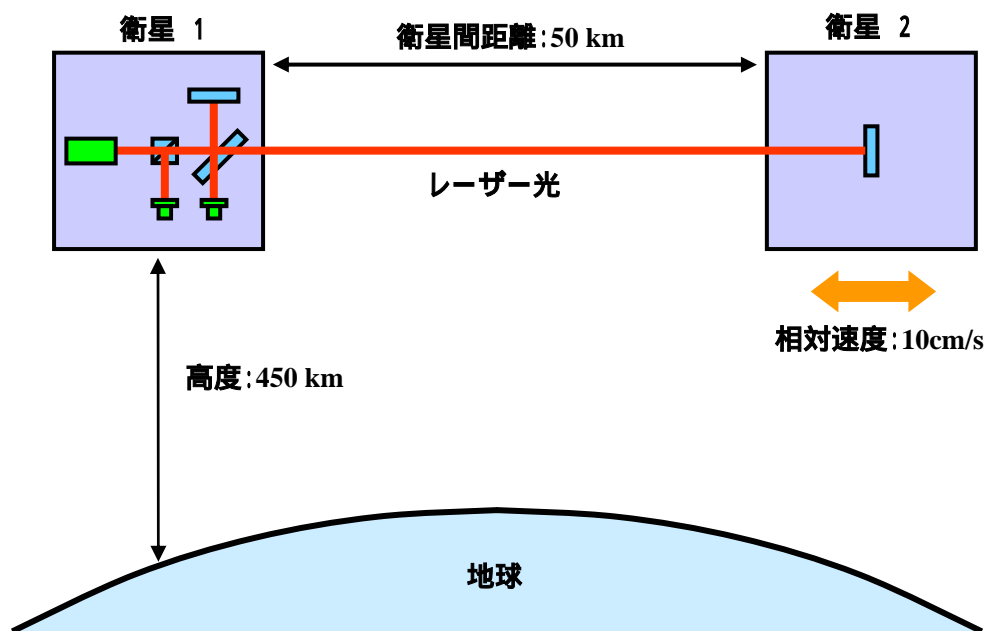


図6. 衛星間測位の概念図

まず、ミッド・フリンジへの制御は音響光学素子を用いれば可能である。音響光学素子とは結晶の粗密波による回折を利用して、光の周波数を変化させる素子のことである。図7に示すように  $40\text{MHz} \sim 80\text{MHz}$  の電圧を特殊な結晶に印加すると粗密進行波が生じる。結晶に入射された光は粗密波の回折格子に反射される。簡単な計算によるとこの1次回折光の周波数変化は正確に印加電圧の周波数に等しいことがわかる。

さて図8に示すように、相対速度を持つ衛星によって反射された光はドップラー・シフトを受け周波数が変化するので、そのままと干渉光は周波数の変化分に対応するビート信号になってしまう。例え

ば相対速度 10cm/s を持つ衛星の場合、ビート信号は 200kHz となる。そこで音響光学素子を両腕に挿入し、それぞれに印加する電圧の周波数にドップラー・シフトの周波数分だけ差をつけてやれば、2つの光の周波数を同じにすることが可能である。なお、周波数と位相はお互いに微分・積分の関係にあり、基本的には同じものであるので、この制御により周波数を揃えるだけでなく同時に位相も揃える、すなわちミッド・フリンジに制御することが可能である。

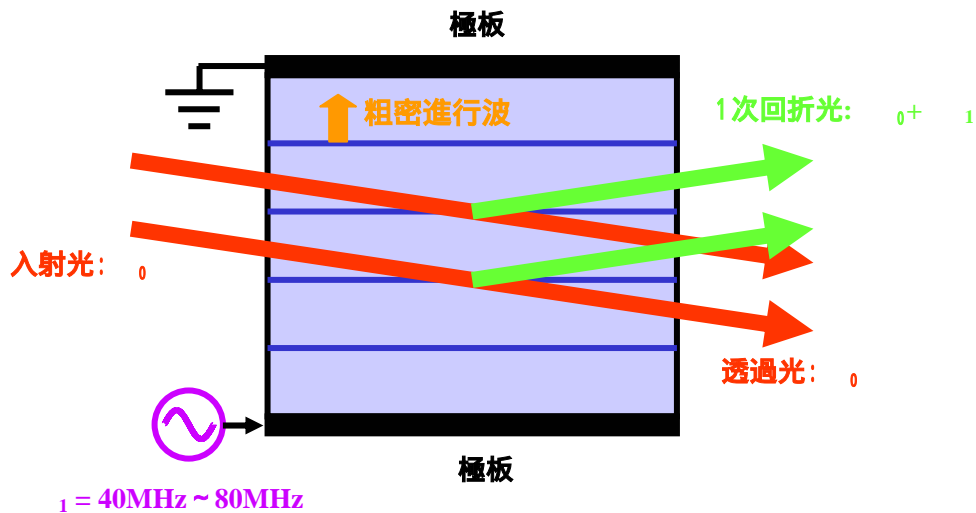


図7. 音響光学素子の原理

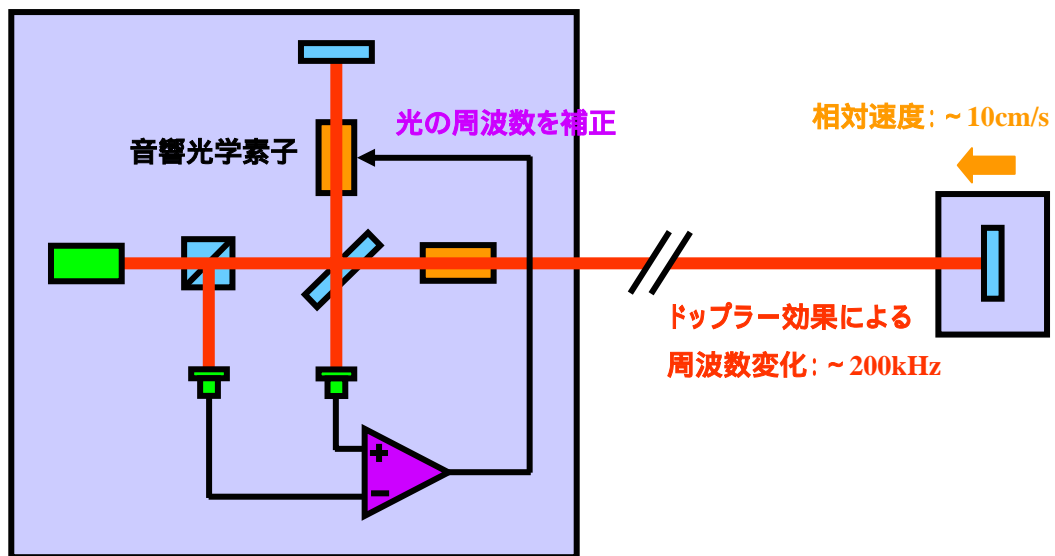


図8. 音響光学素子を用いた制御法

次に両腕の光路長に差があると図 9 に示すように違った時間に出射した2つの光が干渉してしまう。したがって光の周波数が変化するとフリンジが変化する。簡単な計算により、周波数雑音の影響は次式のようになる。

(周波数雑音による変位雑音) = (光路長差) × (相対的周波数雑音)

したがって光路長差:100km の場合、変位雑音:  $10^{-8}\text{m/Hz}^{-1/2}$  を実現するためには周波数安定度:  $10^{-13}\text{Hz}^{-1/2}$  が必要である。これは実現可能な値である。

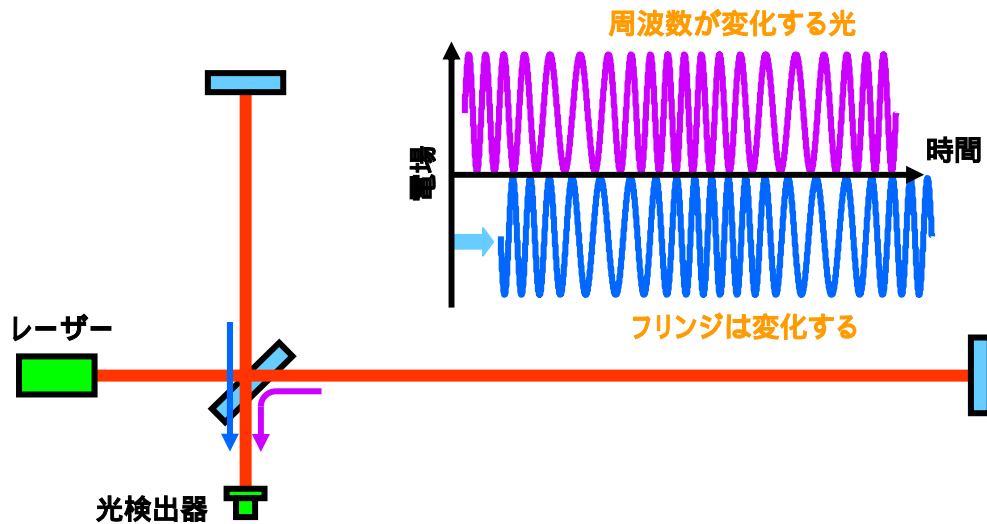


図 9. 両腕の長さが違うマイケルソン干渉計における周波数雑音の影響

以上、実際の衛星間測位においても、音響光学素子を用いることによりミッド・フリンジに制御することが可能であり、したがってレーザーの強度雑音の影響を抑えることができる。また、周波数安定化を行なうことにより、周波数雑音の影響も目標感度を損なわない程度に抑えることが可能である。