

2周波光伝搬位相制御のための ファイバー長精密計測と制御

電子物性工学専攻 植田研究室
内藤朋子

1. はじめに

周波数300 GHz以上(波長1 mm以下)のサブミリ波帯から遠赤外線に至る領域は、地球大気に含まれる水などの分子による吸収や装置開発に伴う技術困難などのために、電磁波の一連のスペクトルの中で最後の未開拓の波長帯として残されている。ミリ波天文学を通じて培ってきた技術力により、これまで困難とされていた高精度アンテナの製作や、サブミリ波帯用の高感度受信機などの開発が可能となりつつある。

現在国立天文台では日・米・欧の3か国国際協力により、ミリ波～サブミリ波で世界最大の巨大望遠鏡ALMA(Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)・12 m級の高精度アンテナ約80台を南米チリ・アンデス5000 mの高地に展開する巨大望遠鏡計画を進めている^{[1],[2]}。

このALMA計画では光技術が重要な役目をこなす。電波干渉計計測では、各アンテナに間で天体信号をミキサで周波数変換する際に局部発振器信号の位相関係が安定である必要がある。電波天文学で一般的に使われているガン発振器を逡倍したものでは広い帯域が得られず、また逡倍することによりノイズも増えるとの理由から、光を使った局部発振器(フォトリックローカル)の開発が進められている^[3]。フォトリックローカルとは、周波数、位相安定化を行った2台のレーザー光を混合し、差周波が局部発振器となるよう、各アンテナへ共通の光信号を分配・伝送するシステムである。

フォトリックローカルには主要となる技術として、安定化された差周波の発生、伝送時の位相制御、受光時のTHz発生があげられる。

本講演ではそのフォトリックローカルの伝送部分、つまり伝送信号の位相制御について述べる。

2. 干渉計測

ALMA計画では各アンテナ間は最大10km離れており、レーザー光伝送には伝搬する際に損失が少ないシングルモードの光ファイバー(SMF)、1.5 μm帯を使用する。

先にも述べたようにフォトリックローカルでは各アンテナ間の位相関係が重要である。各アンテナ間の位相差は10°(10 kmに対して約10 μmの誤差)以内であることが要求されている。

しかし、位相差に直接関係するファイバー光学長は温度・気圧などの要因により変動し、このことが問題となる。ファイバーの線膨張係数は約 10^{-6} /mであり、10 km伝送させた場合には1°の温度変化に対して数センチの変動となる。この変動を数μmにまで抑えなくてはならない。

ファイバー内の光学長変化を制御するためには、干渉計測により光学長変化の揺らぎを測定しなくてはならない。

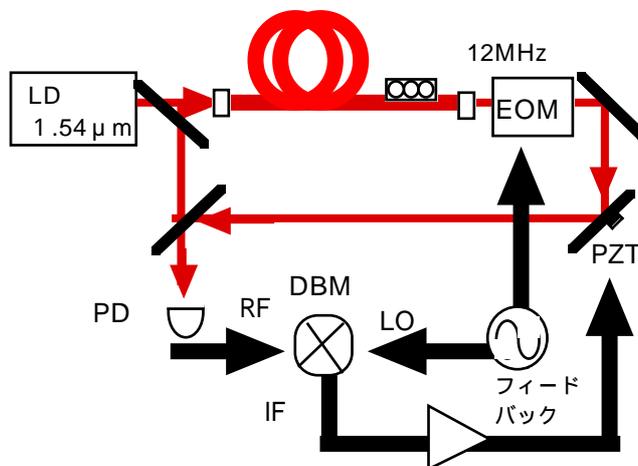


Fig.1 Mach-Zehnder干渉計

Fig.1の様にマッハツェンダー干渉計を構成する。o点での光路差($L_1 - L_2$)が $m \lambda$ に等しければ互いに強めあ

う干渉が生じ、その光路差が $(m-1/2)$ に等しければ互いに弱めあう干渉になる。このことから、干渉縞は光路長差に対応しており、間隔は波長と等しくなる。

したがって自由空間の光学長がほぼ一定と仮定した場合（マウントなどが揺らがないと仮定する）、どの程度ファイバー光学長が変化したのかを観測することができる。

レーザーの強度雑音の影響をさけるために、FMサイドバンド法を採用する。電気光学素子(EOM)により位相変調を加え、電氣的に復調することにより信号を得る。FMサイドバンド法を採用することにより、より高精度の光学長測定が可能となる。

3. 狭帯域半導体レーザーの作製と評価

本研究でレーザーに求められるのは、コヒーレンス長とシングルモード発振である。

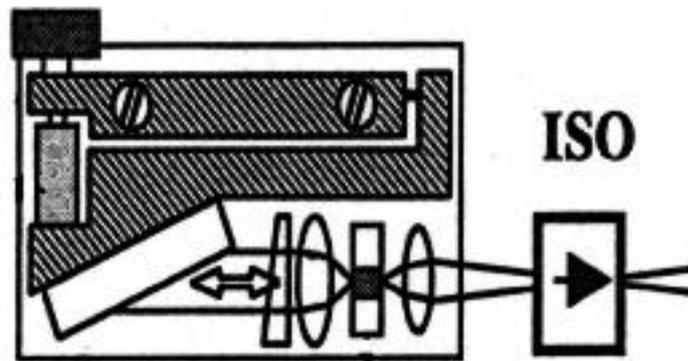
下記の関係式をみることにより、コヒーレンス長の長いレーザーは線幅が細いということがわかる。

$$L = c\tau = \frac{c}{\nu}$$

ここで、 L 、 τ 、 ν はそれぞれコヒーレンス長、光子寿命、レーザー線幅である

半導体レーザー(LD)の無制御時の線幅は数10 MHzであり、コヒーレンス長に直すとたかだか30 mしかない。本研究では2 kmのファイバーを使用して実験する予定であるため、最低でも150 kHz(コヒーレンス長にして2 km)の線幅は必要である。

そのため、外部共振器型のLDを作製した。片面をARコートさせたLDの端面とグレーティング(回折格子)で共振器を構成することにより線幅の狭窄化・単一モード化がはかられた^[4]。Fig.2 に内部構造を示す。



グレーティングとLDの端面で共振器が構成されている。

Fig.2 外部共振器型半導体レーザー内部構造

最大出力パワーは6 mWであり、グレーティングの角度を変えることによりLDの波長は2 nmの連続掃引（周波数にして200 GHz）が可能である。

伝送できる光パワーはファイバー内の誘導ブリュリアン散乱によって制限されてしまう。SMFでは10 mW以上はファイバーに入射させてしまう誘導ブリュリアン散乱が起こり、後方散乱により信号のS/N比が悪化する。

線幅測定には、音響光学素子（AOM）により80 MHzの変調を加えた自己遅延ホモダイン法を用いた^[5]。測定系と結果をFig.3に示す。

1.8 kmファイバを利用して測定したが、コヒーレンス長内であったため正確な線幅を測定することができなかった。この測定では150 Hz以下ということしか述べられない。設計上では、100 kHz以下であるということになっている。しかし今回行う実験には十分なレーザーである。

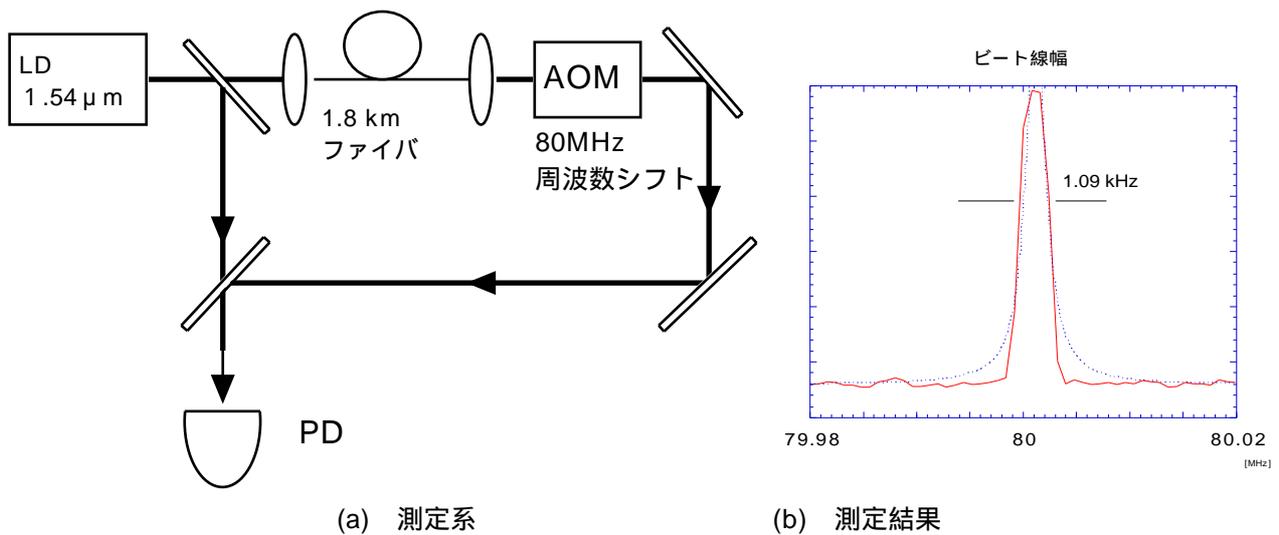


Fig.3 線幅測定の測定系と結果

4. 実験と結果

干渉信号で最大のコントラストを得るためには同一偏波であることが必要である。またEOM結晶の電場方向に垂直な偏波が入射すると強度変調が起こり、復調信号ではノイズとして観測される。これらの理由から温度変化に対するファイバーの偏光特性を調べる必要がある。

ポピンに巻いてある光ファイバーを箱で覆い、箱の外部から中の空気が均一の温度となるようにを白熱灯で温めた。偏光ビームスプリッター(PBS)を通して、検出されるレーザー光の強度変化を測定した。その結果をFig.4に示す。縦軸は偏光比(p偏光強度/S偏光強度)から、偏光回転を示している。図からわかるように1の温度変化に対して偏光は約8 deg回転する。

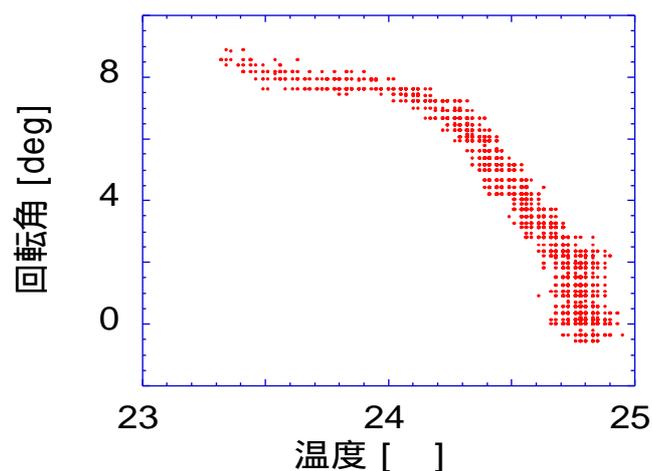


Fig.4 偏光の温度依存性

この結果は、ポピンという均一にまかれた状態での値であるため、ファイバーをのばして使う際温度依存性は変わることが予想される。本研究ではこのポピンに巻かれたままで実験を行うため、この値を使用する。

本研究で予想される光学長の変動はフリンジの数は、観測できるフリンジ数の10倍にもなる。そのため直接フリンジを観測するのではなく、ファイバーによる光学長変化を補償する様に電的に制御部を自由空間に取り付ける。光学長を一定に保つように補償された制御信号から、光学長変化を見積もることができる。

光学長の補償にはPZTを使用する。ファイバーによって変動した光学長をミラーを取り付けたPZTを動かすことによって一定にロックする。

Fig.5に光学系を示す。LDの出射光をビームスプリッター(BS)により、ファイバーに入射する光と参照光にする光に分ける。

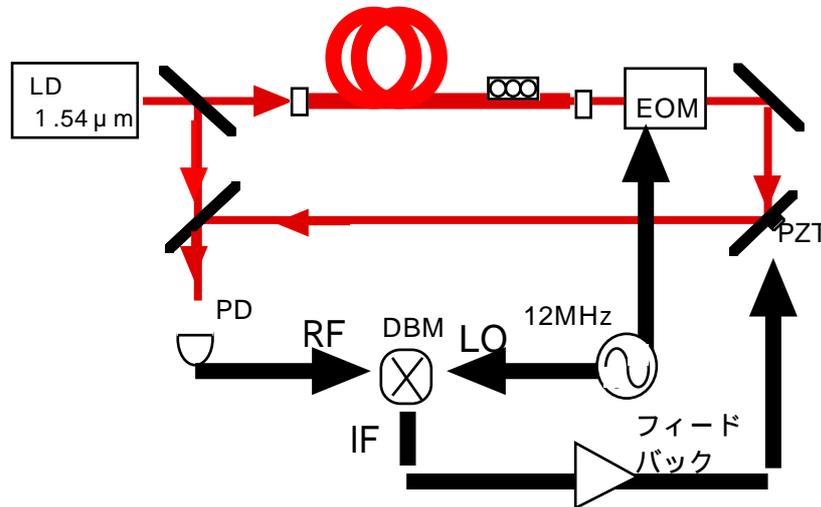


Fig.5 測定系

ファイバー伝送させたレーザー光をEOMで位相変調(変調周波数12 MHz)をさせ、参照光と干渉させる。EOM結晶には常にS偏光が入射するように偏光を制御しなくてはならないためファイバーに偏光子を取り付けている。

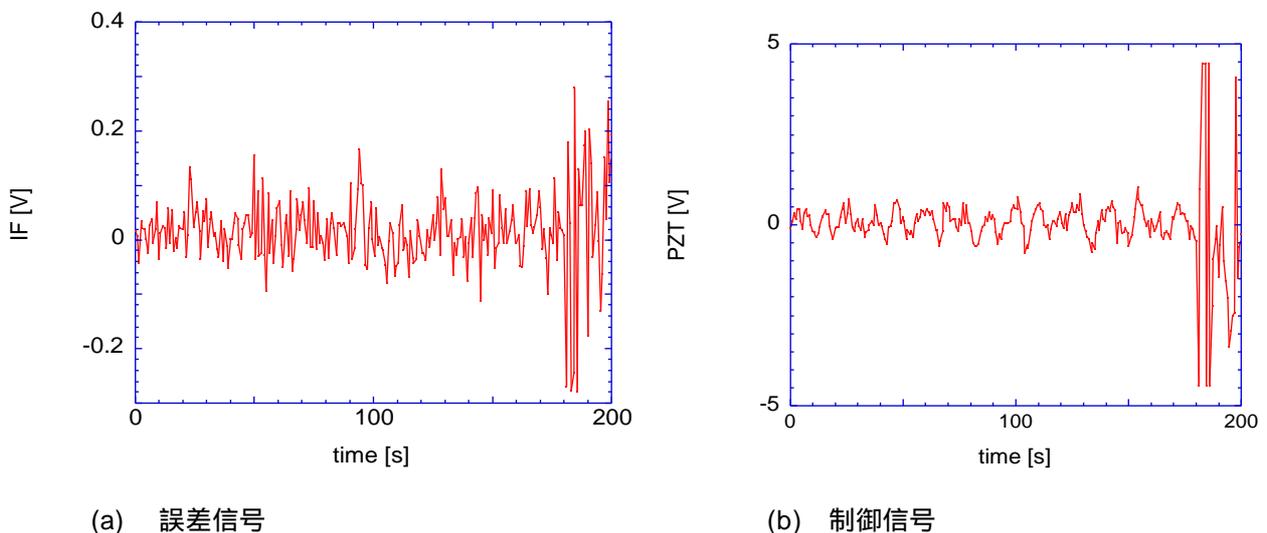


Fig.6 測定結果

Fig.6(a)は誤差信号つまり位相雑音を示している。この図のロックされている部分のピークを読む事により測定光の光路長は130 nm(@10 m)の範囲で揺らいでいる事が読み取れる。そして、(b)のPZTへフィードバックする信号のピークを同様に読み取る事によってファイバー長は950 nm(@10 m)変動しているということがわかる。180秒でロックが外れている。

また、ロックの安定性をあげるために信号のダイナミックレンジを大きくする事を検討した。そのために

2周波の干渉を使う。2周波を干渉させる事により和周波成分と差周波成分が発生する。波長の長い差周波成分のみを取り出す事ができれば信号のダイナミックレンジを広げた事になる。

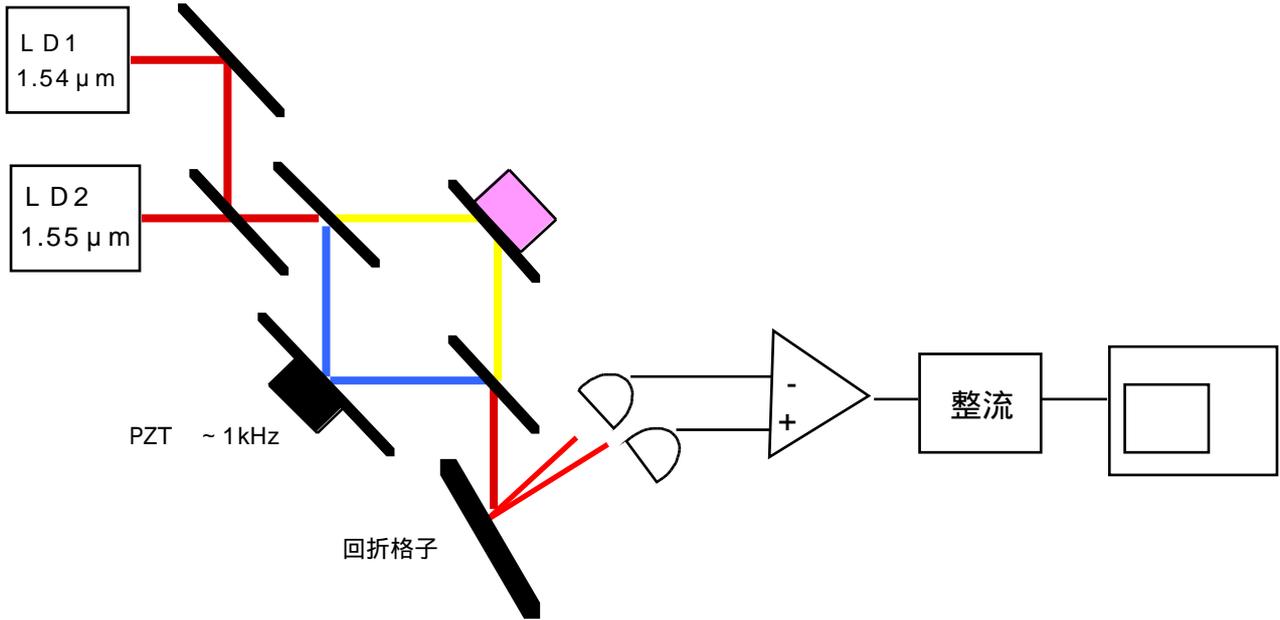


Fig.7 実験系

Fig7のように0.01 μm 波長を離れた2台のLDを使い同じ光軸のマッハツエンダー干渉計を構成する。黄色が測定光、青が参照光となっている。測定光はオプトマイクで光路長を変化させている。足し合わせた光を波長ごとに切り出す必要があるので回折格子を用意した。それぞれのフォトディテクタからの電気信号を引き算し整流する事により信号を取り出す。また、最後に時間平均を取るため参照光をPZTを使いkHz程度でふる。

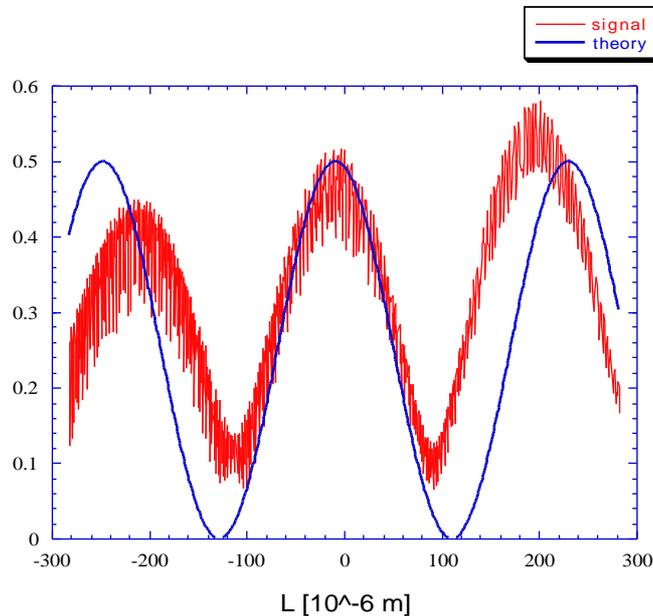


Fig.8 2周波の差周波フリンジ

赤いフリンジが実験結果、青いフリンジが理論値である。2つのフリンジで1波長となっている。実験値、理論値それぞれの波長は409、480 μm であった。このグラフから実験値の信号のダイナミックレンジは200 μm に広げられた事がわかる。測定光のノイズはオプトマイクを動かす時のノイズであり1ステップ動かすごとに0.02 μm 程度揺らいでいる。しかしこれは使用したオプトマイクを変えれば軽減出来るものである。

5. まとめ

ALMA計画におけるフォトニックLOの伝送時に問題となるファイバーの光学長の変化の測定と制御を目的とした。

そのためにまず外部共振器型半導体レーザーを作製した。作製したLDの最大出力パワー、中心波長、連続掃引波長、線幅はそれぞれ、8 mW、1.548 μm 、0.02 nm、150 kHz以下であった。

FMサイドバンド法を用いて計測したファイバー光学長の変動は積分時間180 秒において950 nmであり、このとき全光学長の揺らぎは130 nmに抑制されている。

実際に10 kmにファイバーをのびした場合、130 nmに光学長がロックされれば十分活用できると思われる。しかし、信号のS/N比が10 kmにすることにより悪化することが考えられる。

1波長のみでの干渉計で行うと0.7 μm 程度の揺らぎしか制御できないため2波長での干渉実験を行い、誤差信号のレンジを約200 μm まで広げること成功した。

6. 今後の課題

ファイバーによるアクチュエータを考えなくてはならない。10 mで950 nm揺らぐのであれば単純に考えて10 kmに伸ばすと揺らぎは約1 mmである。これを補償出来るようなアクチュエータの開発をしなければならない。そこで実際にアンテナに伝送させるファイバーは温度変化に対して鈍く通常の1/10 程度しか変動を受けないものを使用する。そして中央局でノーマルファイバーで制御する事により1/10の長さのファイバーに同程度の温度変化を与えただけで十分に補償が可能と考える。また早いアクチュエータが必要であればファイバーをPZTに巻き付ける等の方法を取ればよい。このような事を提案だけでなく本当に使える事を実証する必要がある。

参考文献

[1]大型ミリ波サブミリ波干渉計検討会(1997)：大型ミリ波サブミリ波干渉計(LMSA)計画.

[2]上田暁俊、石黒正人：アンデスの巨大電波望遠鏡ALMAと光技術、光学(2001)、Vol.30,No.8,pp499-503.

[3]John Payne,Bill Shillue,Andrea Vaccari : Photonic Techniques for Use on the Atacama Large Millimeter Array,ALMA memos No.267.

[4]K. B. MacAdam,A. SteinbachC. Wieman : A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback,and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb,Am. j. Phys. vol60(1992), No.12, pp1098- 1111.

[5]T. Okoshi,K. Kikuchi,A. Nakayama : Novel Method for High Resolution Measurement of Laser Output Spectrum、Electronics Letters,Vol.16(1980),No.16,pp630-631.