

光ファイバーを用いた ミリ波基準信号配信システムの開発

電気通信大学大学院 量子・物質工学専攻 植田研究室
0333013 佐藤洋平

1 序論

1.1 背景

本研究の背景である、ALMA 計画の概要について説明する。ALMA とは、Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array の略で、日・米・欧の3極国際協力により進められている、世界最大の電波天文台建設計画である。

- ・観測目標： 原始惑星系，遠方の銀河
- ・観測帯域： 30~950GHz(ミリ波/サブミリ波)
- ・目標解像度： 0.01 秒角

計画では、電波干渉計という方法を用いて、この解像度の実現を図っている。これは、複数台の小型アンテナを距離を置いて配置し、全てのアンテナで同一の天体の電波を観測する方法である。そして、得られた信号の干渉(相関)させると、実現不可能な大口径のアンテナと同等の分解能を得る事が出来る(図1.1 参照)。

予定されている観測周波数は30~950GHzであり、最大でSub-THzの領域にまで及ぶ。計画では、このSub-THz帯の信号を10kmは伝播させなければならない。しかし、この周波数帯は、通常の金属を用いたケーブルでは減衰が大きく、これだけの長距離伝送は不可能である。そこで、受信した信号は、即座にダブル・バランスド・ミキサ(DBM)等のミキサを用いて、伝送可能な周波数帯まで周波数変換(Down-

Conversion)される。この時、基準信号が必要となるが、電波干渉計では、この基準信号の相対位相が、全てのアンテナ間で極めて安定である必要がある。しかし、電波干渉計の場合、各アンテナで信号を発振していたのでは、発振器の個体差等の影響で、相対位相は一定しない。故に、一箇所で発生させた信号を各アンテナまで伝送し、これを基準信号として利用する必要がある。ここで、基準信号を如何にして伝送するかという問題が発生する。ALMA 計画では、光技術を用いる事で問題の解決を図っている。この光技術が、フォトリック・ローカル(Photonic-Local)と呼ばれる技術である。

1.2 フォトリックローカル

周波数が ν_m 違う二つのレーザー光源を用意し、この光を一つのフォトダイオードに照射すると、差周波数である ν_m の電気信号が得られる。フォトリック・ローカルは、この現象を利用して得られる ν_m の電気信号を、基準信号として利用する。

原理を説明する。図1.2に構成を示す。基準信号の発生局には、周波数差を正確に設定した2つのレーザー光源を設置する。この2つの光源から出力された光を、光ファイバーを用いて各アンテナまで伝送する。各アンテナには、ミリ波帯まで周波数特性の届く高性能フォトダイオード(PD)

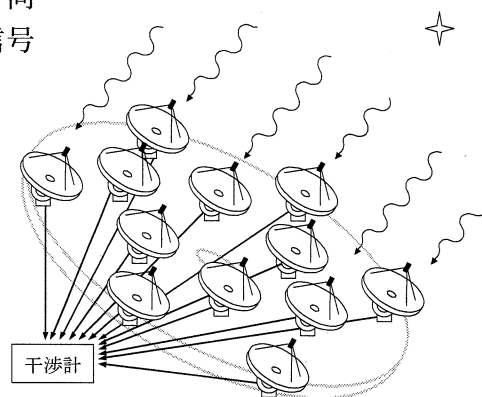


図1.1:電波干渉計

が設置してあり、ここに、光ファイバーで伝送されてきた光が照射され、差周波数である ν_m 信号を得る。この信号を基準信号として利用する事で、全てのアンテナにおいて基準信号を高い相対位相精度で取得する事が可能となる。伝送路長は、約10km程度が想定されている。ここに、以下に示す信号を伝送しなければならない。

- ・基準信号の周波数 ν_m : 最大で950GHz
- ・相対位相誤差 ϕ_m : 0.1rad 以下

これを実現するには、伝送路長の変動が、 $3\mu\text{m}$ 程度以下でなければならない。

1.3 光路長制御

これに対し、光ファイバーの材料である石英ガラスの物性は、式1.1の通りである。

$$\frac{1}{L} \frac{d(nL)}{dT} = 1 \times 10^{-5} (\text{K}^{-1}) \quad (\text{式 1.1})$$

これは、温度が1度変化するだけで、光路長が10cmも変動してしまう値である。このままでは、フォトニック・ローカル伝送の用途には耐えられない。この為、光路長を何らかの方法で制御する必要がある。

この制御システムの原理を説明する。構成を、図1.3に示す。基本は、伝送路を片腕としたマイケルソン干渉計であり、その干渉信号が常に一定になるように、Fiber Stretcherに帰還制御を掛ける。これにより、伝送路長は常に一定に保たれる。ここに基準信号を伝送する事で、必要な位相安定度を維持した基準信号の配信が可能となる。

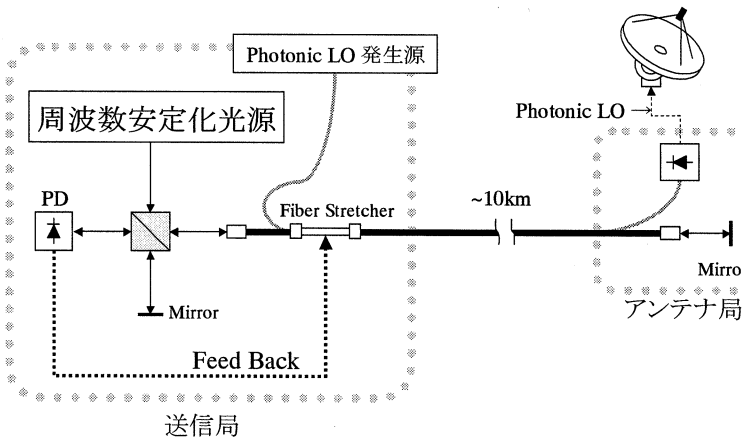


図1.3: 光路長制御システム

値は、30km以上の光路長差をつけてから光干渉計測を行う本システムを実現する上で、コヒーレント長も30km以上が必要という要求から来ている。

残る課題は、如何にして制御を掛けるかという点である。この問題の解決が、本研究の目的である。

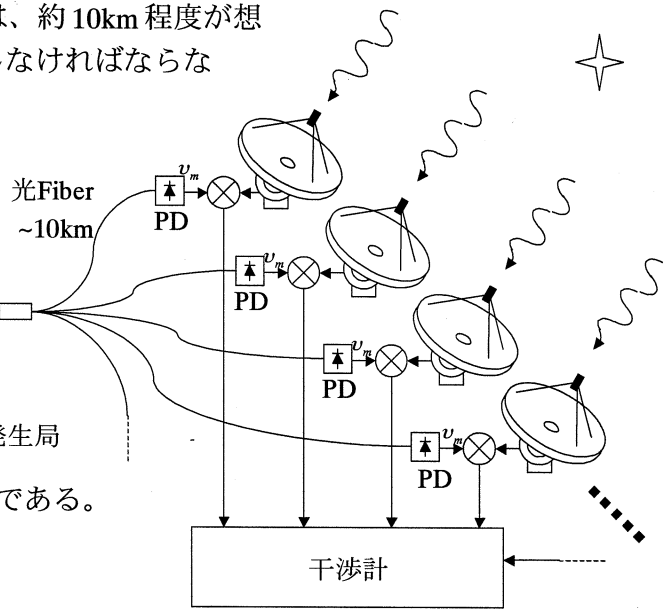


図1.2: フォトニックローカル

1.4 研究目的

ここで重要となるのが、光路長の長さ基準となる周波数安定化光源と、如何にして帰還制御を実現するかという2点である。

光源に関しては、私が卒研時に取り組んだものを使用する。しかし、この光源では、10kHzという線幅の要求を満たしていない(表1.1)。この

表1.1: 光源の評価

	要求値	実現した性能	評価
波長	1.5 μm 帯	1.5 μm 帯	○
周波数安定度	$< 3 \times 10^{-10}$	$< 2.1 \times 10^{-11}$	○
線幅	$< 10\text{kHz}$	$\sim 300\text{kHz}$	×

2 Phase Frequency Discriminator

2.1 原理

線幅の問題を解決する手段として、新しい復調器を導入し、これをPhase Frequency Discriminator (PFD)と名づけた。この原理について説明する。図2.1に構成を示す。通常のデジタル式Phase Sensitive Detector(PSD)のXORの部分に、デジタル加算器が有る事が分かる。これにより、PFDはPSDを多ビット化したものであると考えることができる。

また、PFDの動作特性を、図2.2に示す。このように、PSD非常に比べて可制御範囲が非常に広がっている事が分かる。

2.2 コヒーレント長に関する考察

位相揺らぎを $\phi_{(t)}$ として、 $f_{(t)} = Ae^{i(\omega t + \phi_{(t)})}$ で表される光を考える。この光を $T(=L/c)$ の時差をつけて干渉させる。

$$f_{(t)} + f_{(t+T)} = Ae^{i(\omega t)} \cdot (e^{i\phi_{(t)}} + e^{i(\omega T + \phi_{(t+T)})})$$

$T \ll t$ とすると、 $\phi_{(t+T)} \approx \phi_{(t)} + \phi'_{(t)} T$ と近似できる。よって、

$$\therefore (\text{与式}) = Ae^{i(\omega t + \phi_{(t)})} \cdot (1 + e^{i(\omega + \phi'_{(t)})T})$$

$(\omega + \phi'_{(t)})T$ は、干渉信号の位相である。 $\phi'_{(t)}$ は位相揺らぎの時間微分、つまり光源の周波数揺らぎである。これが変動すれば、干渉信号も変動する。観測装置の動作速度より周波数変動が十分遅い場合、 $\phi'_{(t)}$ の大きさに関わらず、干渉縞は(流れる場合もあるが)観測可能である。また、観測装置の動作速度より周波数変動が速い場合、周波数変動が大きくなれば、Visibilityは落ちる。しかし、これが

$$-\frac{\pi}{2} \leq \phi'_{(t)} T \leq \frac{\pi}{2}$$

の範囲内であれば、干渉縞の動きは1fringeを超えない為、干渉縞は観測可能である。よって、通常的方式で干渉縞が観測可能な光路長差の条件は、以下の通りである。

$$-\frac{\pi}{2} \leq \phi'_{(m)} T \leq \frac{\pi}{2} \quad -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{c}{\phi'_{(t)}} \leq L \leq \frac{\pi}{2} \cdot \frac{c}{\phi'_{(t)}} \quad 0 < L \text{ より、} \quad 0 \leq L \leq \frac{\pi}{2} \cdot \frac{c}{\phi'_{(m)}}$$

今回の実験において、干渉信号が検出出来ない理由とは、まさに干渉縞の短期の時間変動が大きく、Visibilityの良い信号を得られない事に由来する。しかし、PFDを用いた場合、従来のPFDに比べて可制御範囲が圧倒的に広い為、この変動を一つの直線の上で全て受け止める事が可能である。この為、従来の方式でVisibilityの悪化の理由であった1fringeを超える動きというのは、信号の有効性を奪うという事が無くなる(図2.3)。これが、PFDを用いる事で、線幅の問題が存在しても、制御が掛けられる理由である。

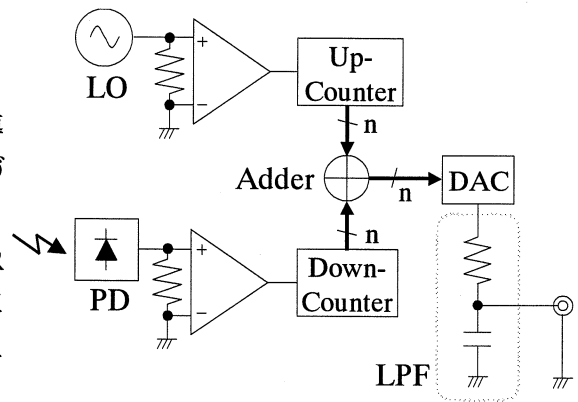


図2.1: Phase Frequency Discriminator

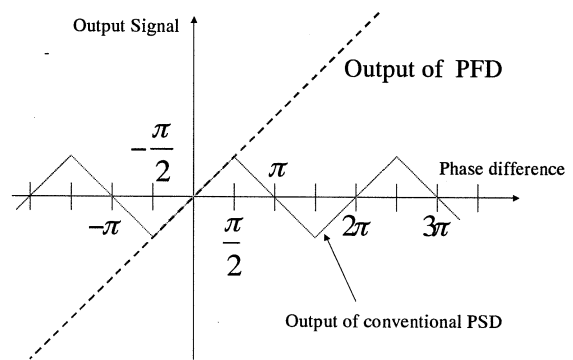


図2.2: 出力特性

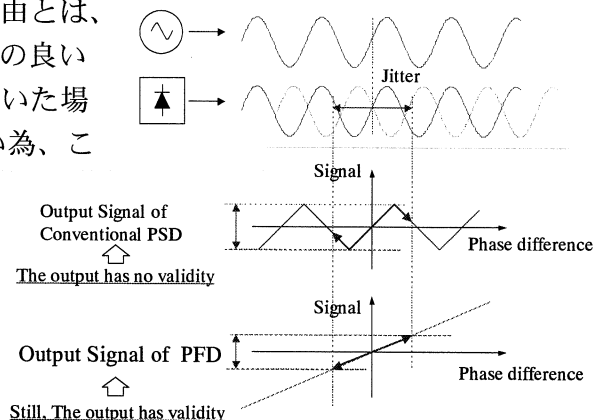


図2.3: 復調器の動作

ここで、干渉信号の有効性を分けるのが、その周波数変動が速いか遅いかである事に注意されたい。干渉縞を出すという事は、必ず時間積分を伴う。この時間積分の時定数より速い領域か遅い領域かが、両者を分けている。PFDでは、この時間積分を出力段のLPFで行っている。このLPFのカットオフ周波数を変えると、干渉縞のVisibilityに影響を及ぼす範囲が変わると言える。このカットオフ周波数を変えて、制御帯域を十分に上げたとすれば、従来の復調器でも対象を制御する事はできるだろう。しかし、今回の実験では、制御対象が30kmの光路長である。つまり、制御対象のステップアップ応答は、原理的に100 μ s以上掛かってしまう。これは、単純なPID制御をやっている限り、制御帯域が10kHz以上は出ない事を意味している。しかし、本研究では、制御対象が30kmの光路長故に10kHz以上の短期周波数安定度が問題となる。よって、従来の方法では、原理的な問題が存在していると言える。本研究では、これを回避出来た意義が大きいと考える。

3 光路長制御実験

3.1 実験目的

PFDを用いる事で、実際のフォトニック・ローカルと同じ条件で、コヒーレント長より長かった場合についても光路長制御が可能である事を実証する。

3.2 実験方法・構成

実験方法について説明する。実験系の構成を図3.1に示す。

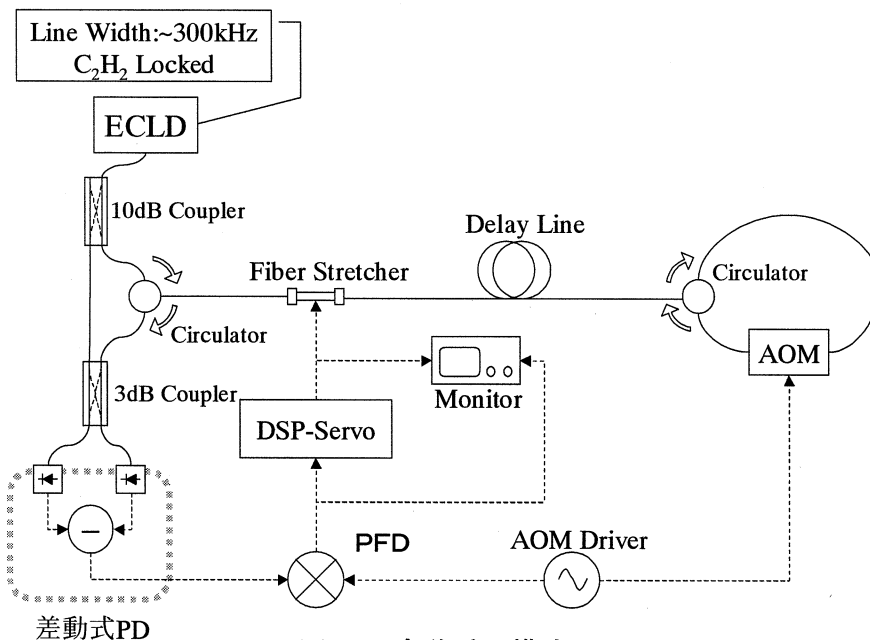


図 3.1: 実験系・構成

この構成は、マッハツェンダー干渉計とマイケルソン干渉計を組み合わせた構成となっている。ファイバーで構成されたマッハツェンダー干渉計にサーキュレータ(Circulator)が組み込まれており、ここから伝送ファイバー(DelayLine)に向けて、計測光を送り出す。この光は、アンテナ局側で音響光学素子(AOM)を用いて周波数をシフトされ、送信局側に戻される。この光を参照光と3dBカプラーを用いて干渉させ、差周波数の信号をフォトダイオードで得る。これを、Phase Frequency Discriminator(PFD)で復調し、干渉信号を得る。この信号をファイバーストレッチャ(Fiber Stretcher)に帰還させる事で、伝送ファイバーの光路長を常に一定に制御する。

光源には、私が卒研時に開発した光源(線幅:~300kHz, コヒーレント長1km)のものを使用した。

Delay Line には、コヒーレント長より十分長い25km のものを使用した。

3.3 実験結果

Delay Line に周期的な外乱を加えて実験を行った。この時の実験結果を、図 3.2 に示す。

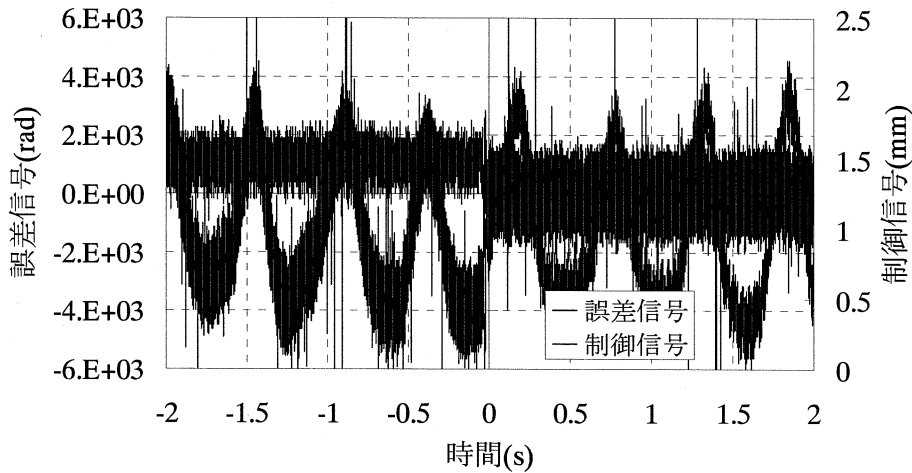


図 3.2: 誤差信号, 制御信号

時刻0を境に制御を開始している。制御開始前は、加えられた周期的な外乱に対応する誤差信号の変動が見えられる。そして、制御開始後、この値は一定となり、制御信号から外乱が補正されている事が読み取れる。

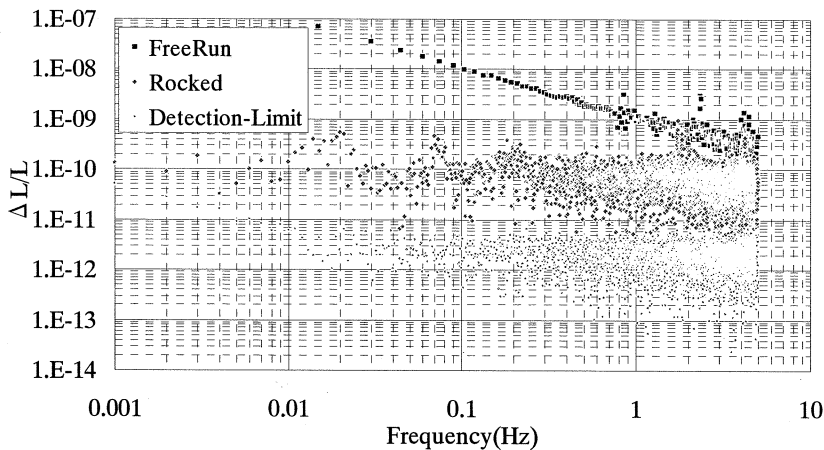


図 3.3: 誤差信号スペクトル

これにより、制御が実現できている事が証明された。

また、この誤差信号の離散フーリエ変換を行った。図 3.3 は、その結果を $\Delta L/L$ に換算したものである。青で示したデータが無制御時のデータ、赤で示したデータが制御時のデータである。図 3.3 より、制御実施時の誤差信号スペクトルが、無制御時と比較して、0.01Hz の領域で 3 桁程度高精度である事が読み取れる。

また、この $\Delta L/L$ の分母は、25km である為、 10^{-10} で誤差が $2.5\mu\text{m}$ である。図 3.3 からは、制御時のデータが、この値をほぼ実現出来ている事が読み取れる。所々に値が上回ってしまっている部分が散見されるが、これは制御システム側の発振等の問題であり、DSP 内のプログラムを最適化する事で解決可能であると考えられる。

続いて、ここに実際に 6.185GHz の基準信号を伝送させる実験を行った。

その結果を、図 3.4 に示す。

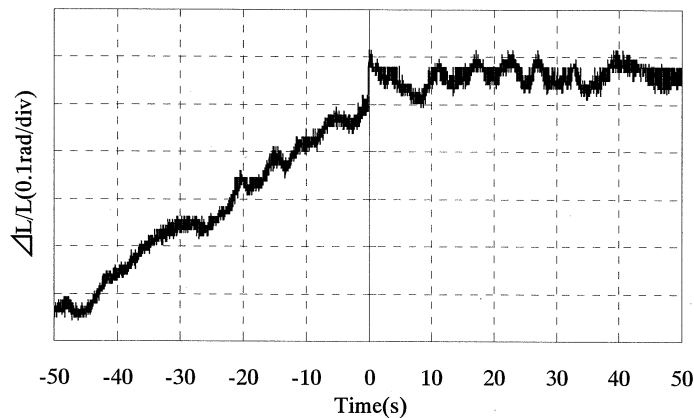


図 3.4: 基準信号の出力位相

図中時刻 0 秒を境に制御を開始している。制御開始前において変動していた出力信号の位相は、制御開始と同時に、一定の値に安定化されている。0.1rad 程度の変動が残っているものの、これにより、出力信号の位相に対して、光路長制御システムが有効であることを確認した。

3.4 結論

光路長制御システムの実現に成功した。

- ・フェイズスリップ: 無し
- ・光路長制御の継続性: 数分間
- ・到達安定度: $\sim 10^{-10}$ @25km
- ・短期位相安定度: 0.1rad@6.185GHz
- ・長期位相安定度: 1.3×10^{-3} rad@6.185GHz

3.5 考察

以下の 2 つの式で示される周波数の違う 2 つの光の Beat について考える。

$$\begin{cases} l_1 = A_1 e^{i\omega_1 t} + B_1 e^{-i(\omega_1 t - \phi_1)} \\ l_2 = A_2 e^{i\omega_2 t} + B_2 e^{-i(\omega_2 t - \phi_2)} \end{cases}$$

$\omega_1 - \omega_2 = \Delta\omega$ として、Beat 成分を求めた。式 3.1 に、これを示す。

$$|(\text{Beat成分})| = \sqrt{A_1^2 B_2^2 + A_1 A_2 B_1 B_2 \cos(2\Delta\omega t - \phi_1 + \phi_2) + A_2^2 B_1^2} \quad (3.1)$$

このように、Beat 信号の位相は、各成分の相対位相 (ϕ_1, ϕ_2) に依存している事が分かる。これは、偏光状態の回転により、出力信号の位相が変動してしまう事を意味する。また、各成分の振幅も出力信号の強度に影響を与えてしまう。これにより、システム中の光学素子の非等方性等が結果に影響していると考えられるが、今のところ、はっきりとした理由はわかっていない。

4 まとめ

光路長制御システムの技術的課題を、ほぼ解決することが出来た。今後の展望としては、出力信号の 0.1rad の位相変動の原因を解決し、システムをより完璧なものにしたい。また、この制御システムを、ALMA 計画だけではなく、高精度時刻同期といった、他の応用についても検討して行きたい。