

# 光ファイバーを用いた長距離高安定基準光伝送

植田研究室 山口昌人

## 1. はじめに

近年、光格子時計などの高精度な基準光信号をその精度のまま光ファイバーを用いて長距離伝送させることが、通信や計測、量子エレクトロニクス分野で必要性を増している。しかし、長距離伝送では光ファイバーの位相雑音が基準光の伝送に大きな影響を与えてしまうので、高精度な伝送をおこなうにはこの雑音を抑制する必要がある。植田研究室では光ファイバーを用いた安定化伝送システムを開発したが、この安定化伝送システムでは Fiber Stretcher を用い、制御範囲 5mm のファイバー長制御より安定化を行っていた。しかし、100km 光ファイバーでは位相変動が非常に大きくファイバー長による制御ではその範囲が 400mm 以上も必要であり、ファイバー長制御だけでは対応できない事が判明した。そこで本研究では音響光学素子 (AOM) に周波数制御を行なわせる事によって位相雑音を抑える制御システムを開発し、外部環境に敷設された 100km 光ファイバーを用いて位相雑音の制御をおこなった。

## 2. 原理

本研究で使用した安定化制御システムは図 2.1 のようにマイケルソン干渉計を応用した形となっている。AOM は remote 側で周波数シフトを行ない、終端まで到達した伝送光を識別する役割を担っている。これによって参照光とのビート信号には周波数シフト分+位相雑音の信号が見える。そしてこの位相情報を Phase Frequency Discriminator (PFD)によって検出している。PFD は Local Oscillator と干渉信号に Up counter と Down counter を用いる事によってそれぞれ 1 パルス毎に加算器が Up と

Down を処理する。これによって位相が半波長ずれると電圧が 1 ビット分上下するので、図 2.2 のように観測できる位相検出範囲を  $-\pi/2 \sim \pi/2$  から、その 2 ビット倍まで広げる事が出来る。

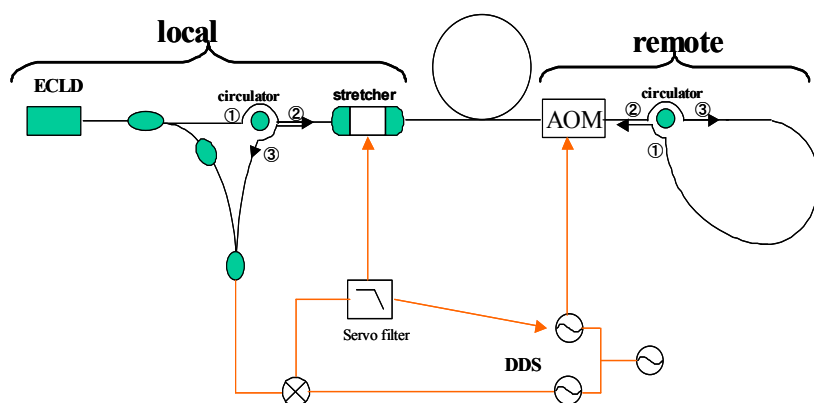


図 2.1 安定化制御システム

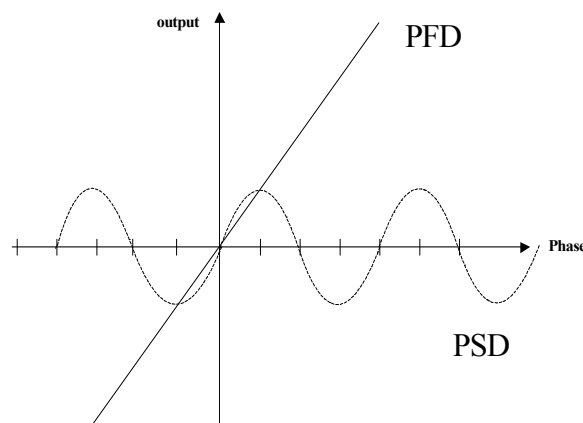


図 2.2 PFD の位相検出範囲

PFD によって検出した位相情報はサーボ回路によって制御信号に変換され、ビート信号の位相雑音が 0 となるように Fiber Stretcher と AOM にそれぞれフィードバックされる。この際、AOM へのフィードバックでは、Direct Digital Synthesizer (DDS)を用いて AOM の周波数シフト分の信号にさらに制御信号を加えた

形でフィードバックを行なっている。

位相と周波数の間には

$$\phi = \int f dt$$

の関係があるので、AOM の周波数を変化させる事により、位相を大きく変化させる事が可能となる。これより、Fiber Stretcher の制御範囲を超える大きな位相変動にも対応が可能となった。

また、DDS からの出力周波数は

$$f_{out} = (\Delta \text{位相} \times \text{システムクロック}) / 2^{32}$$

となっているため、出力周波数が変化しても位相情報は保持されたままとなる。

### 3. 実験

#### 3.1 実験方法

図 3.1.1 のような実験系を組み、100km 光ファイバーの制御実験を行なった。光源のある側を local 側、出力する側を remote 側とした。光源には 1.5 $\mu\text{m}$  帯の ECLD を使用した。ECLD から 2mW のレーザー光を光ファイバー内に入射させ、それをエルビウム添加光ファイバー増幅器 (EDFA) で 20mW まで増幅させた。

また、remote 側からの往復させる戻り光も EDFA で 20mW まで増幅させた。

PFD の Local Oscillator には DDS によって作成した 55MHz の基準信号を入力している。

測定には、光源から入射された信号と remote 側からの出力信号とのビート信号を out loop とし、PFD へと入力される参照光と往復した伝送光との干渉光の誤差信号を in loop としてそれぞれ PFD を用いて測定した。このとき、測定には AOM に伝送光が一度した通過しない片道型配置と、往復で 2 回通過する双方向型配置の 2 通りでそれぞれ測定した。

また、AOM は伝送光が一回通過する毎に 55MHz の周波数シフトを行なっている。よって双方向型配置の場合は合計で 110MHz の周波数シフトを行なっているため、参照光と往復した伝送光のビート信号では 110MHz が検出されることになる。PFD に入力されている Local Oscillator は 55MHz なので、双方向型配置の場合にはビート信号の周波数を DDS を用いて 110MHz から 55MHz に周波数を変化させてから PFD に入力させた。

その後、AOM を双方向型の配置にし、in loop と out loop の位相雑音スペクトルを測定した。

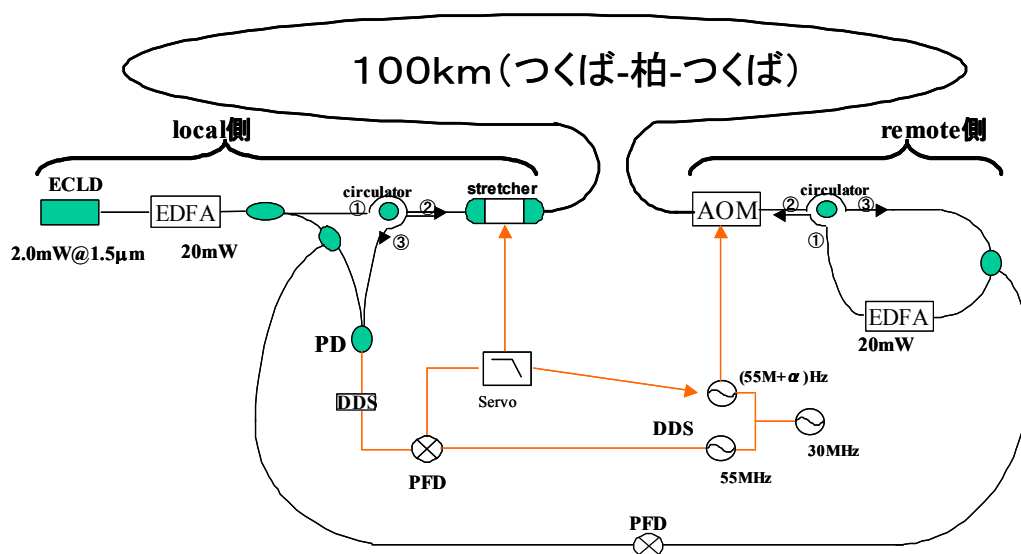


図 3.1.1 実験図

### 3.2 実験結果・考察

片道型と双方向型による測定結果を示す。

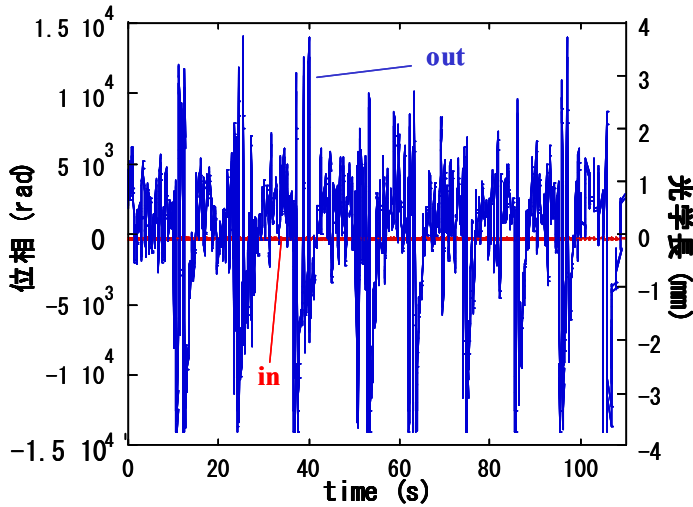


図 3.2.1 片道型配置

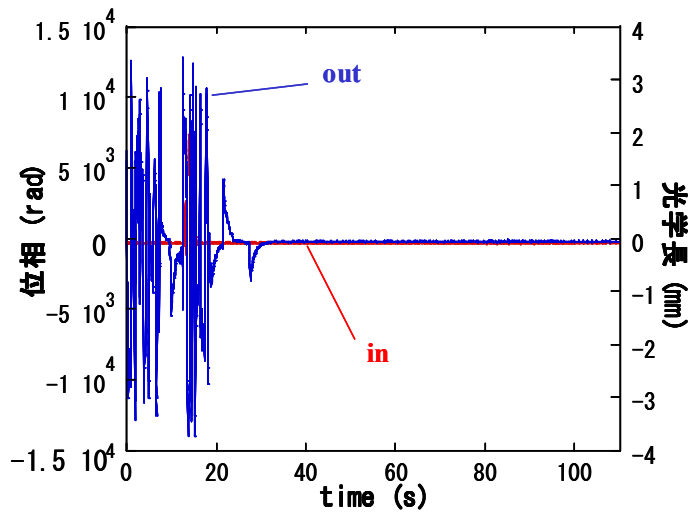


図 3.2.2 双方向型配置

図 3.2.1 と図 3.2.2 より、片道型配置の制御では out loop に光ファイバーの付加位相雑音とみられる雑音が観測され、out loop で信号が制御された事が確認できなかったのに対して、双方向型配置の制御では in loop と out loop 共に制御後に位相雑音の値が一定となり、in loop, out loop 共に制御がされていることがわかった。

次に、制御素子の配置を双方向型配置にした時の in loop, out loop それぞれの位相雑音スペクトルの測定結果を図 3.2.3 に示す。

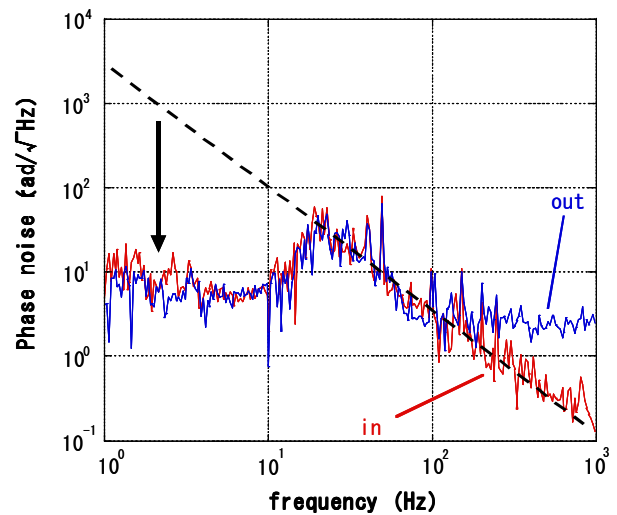


図 3.2.3 位相雑音スペクトル

制御をかけなければ  $1/f$  の傾きで低周波領域になるほど位相雑音レベルが上昇するところを、制御をかける事によってそれを  $10\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  まで抑えられることが確認できた。そして in loop と out loop の位相雑音スペクトルがほぼ同じであることより、remote 側より出力される信号は local 側に入力された信号とほぼ同じ位相雑音であるといえる。これより、本研究の制御システムを用いることにより、 $1\text{-}10\text{Hz}$  の周波数領域で  $10\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  の位相雑音レベルまで  $100\text{km}$  光ファイバーの位相雑音を抑えられることが判明した。

### 4. 結論

本研究では Fiber Stretcher を用いたファイバー長制御に加え、従来は伝送光の終端到達のマーキングのために使用していた AOM に新たに周波数制御を加えた制御システムを用いての制御実験を行なった。

その結果、AOM を双方向型配置の制御素子配置を行なうことによって制御がかかったかどうか容易に判断が付き、remote 側に送られた光信号を位相雑音の付加されていないそのままの状態でも出力出来るということで片道型配置と比べてその優位性を示すことが出来た。そして本

研究での制御システムを用いる事によって、周波数領域 1-10Hz で位相雑音レベルを  $10\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  まで抑えることが出来た。これより、本研究の制御システムを用いる事によって外部環境に敷設された 100km 光ファイバーの基準光伝送が出来るということが確認された。この結果は今回の実験ではじめて得られたものである。

しかし、本研究で使用した制御システムは local 側と remote 側が手元にある状態であり、周波数制御する AOM は remote 側に配置されていた。これでは、実際に遠距離で伝送するためには AOM を制御させる信号も基準光信号と同じ 100km の伝送をさせなければならず、システムに問題が出てきてしまう。よって AOM の制御方法を見直す必要が出てきた。

## 5. 今後の展望

実際に 100km の基準光伝送を行なう時は remote 側の装置を 100km 先に置いた状態での制御を行なう必要がある。そして、その状態で制御をするためには、本研究で用いた制御システムでは remote 側に配置された 1 つの AOM で周波数シフトと周波数制御を行なわなければならないが、そのためには制御信号を 100km 伝送させなければならない。

そこでそれを解決させる方法として AOM を local 側、remote 側に 1 つずつ用意し、それぞれで別の働きをさせる事によって制御させる方法を提案する。

提案する実験系は、図 5.1 のように local 側で周波数制御を行ない、remote 側で伝送光の到達確認用の周波数シフトを行なうことによって問題の解決を図っている。このとき、local 側と remote 側の機器の同期を行なう必要があり、その同期には GPS を用いてシンセサイザーの絶対周波数を同期させることを考案している。

必要となる基準光の伝送における周波数安定度が  $10^{-15}$  であるのを考慮すると、GPS から送られる信号の周波数は 10MHz であるのでその周波数安定度は  $10^{-8}$  ほどの桁が必要となる。これは GPS では十分可能であると考えられる。

また、制御システムがどの程度の周波数安定度であるかを確認するために、アラン分散による周波数安定度の測定も行なう予定である。

そして、今回得られた周波数領域 1-10Hz で位相雑音レベル  $10\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  という値は、光源の位相雑音である可能性があるため、その確認の意味として今回使用した ECLD ではなく、さらに狭線幅な光源を使用しての制御実験をする予定である。

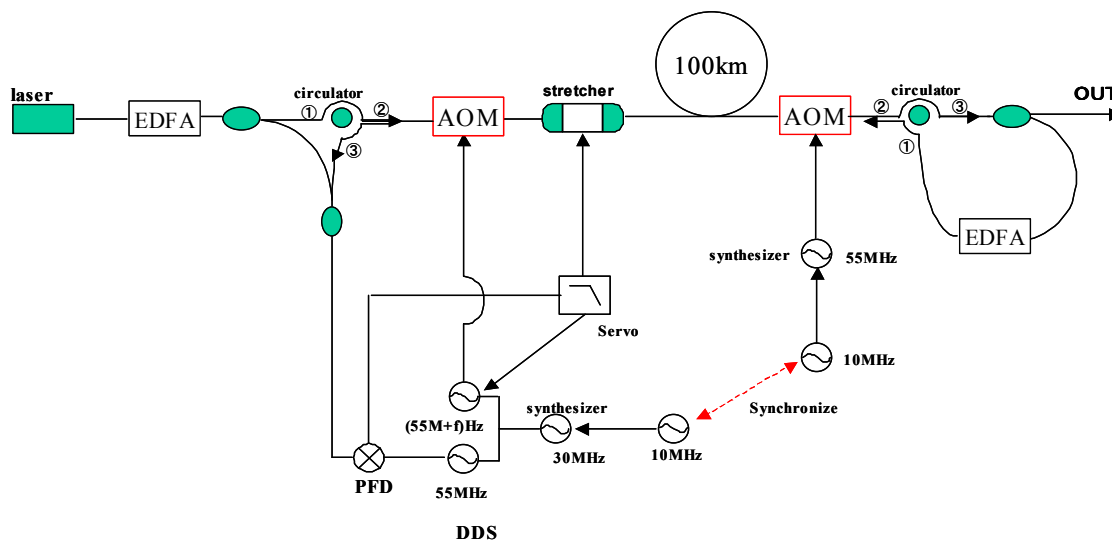


図 5.1 今後の実験系