

RF光伝送干渉計の基礎実験（その2）

第6研究チーム 雨谷 純、国森裕生
時空計測研究室 木内 等

1. はじめに

電波干渉計のRF信号を光搬送波にのせて直接主局に伝送する電波干渉計に関して、その構成、使用する光ファイバーケーブルの最大長の検討結果および基礎実験の結果を昨年報告した⁽¹⁾。その報告の中で本方式の有効性を示したが、屈折率の補正に関する問題も提起した。即ち、本方式では遅延校正に2波長の光搬送波を用いるため、何らかの方法で使用する光ファイバーの2波長の屈折率比を測定する必要がある。この問題を解決するために、ミラーによる反射を利用した屈折率の補正法を導入した。基礎的な実験を行い、この屈折率の補正方法が有効であることが確認された。また、この方式を使用する光ファイバーケーブルの最大長は約41kmであることが回線設計から明らかになった。

2. 屈折率補正を考慮したRF光伝送干渉計の構成

昨年提案したシステム（図1）では、解析局から各観測局に送られた遅延校正信号を、星からの信号と同一の経路により解析局に戻して遅延の校正を行った。この場合、光搬送波の波長が、往路（解析局から観測局の方向） $1.55\mu\text{m}$ 、復路（観測局から解析局の方向） $1.31\mu\text{m}$ と異なるため正確な校正ができなかった。

そのため今回は、それぞれの観測局にたどり着いた校正信号をそのまま反射させ、 $1.55\mu\text{m}$ の光搬送波が解析局と各観測局の間を往復する時間の差を測定することにより、屈折率の影響を取り除く方法を採用することにした。

図2にこの方式のブロック図を示す。各局のアンテナで受信された天体電波源からの信号（目的信号）は、昨年のシステムとまったく同様に、光信号に変換されて解析局に送られ、解析局で再び電気信号に変換された後、共通なローカル信号を用いてIF帯の信号に変換される。

解析局から送られる遅延校正信号は、昨年のシステムと同様、光信号に変換された後分岐され、各観測局に光ファイバーケーブルで伝送される。観測局に到達した遅延校正信号は、光プラーで不均等に配分され（今回の基礎実験では80:20）、一部の光信号のみ電気信号に戻して、通常遅延校正信号として使用される。残りの大部分の光信号は、反射器により反射され解析局に戻される。これは、観測局で反射して解析局に戻ってくる光信号は、観測局でそのまま使用され

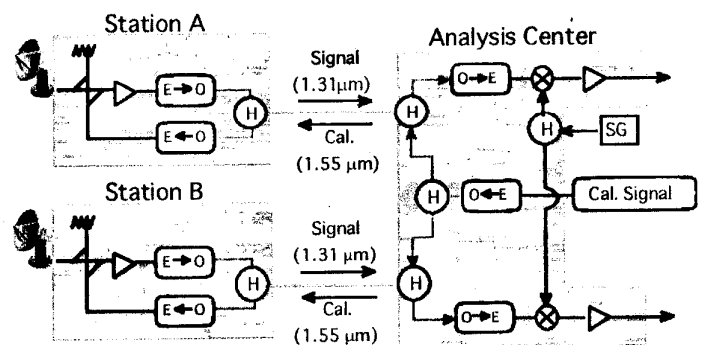


図1 RF光伝送干渉計システム校正
（昨年提案したシステム）

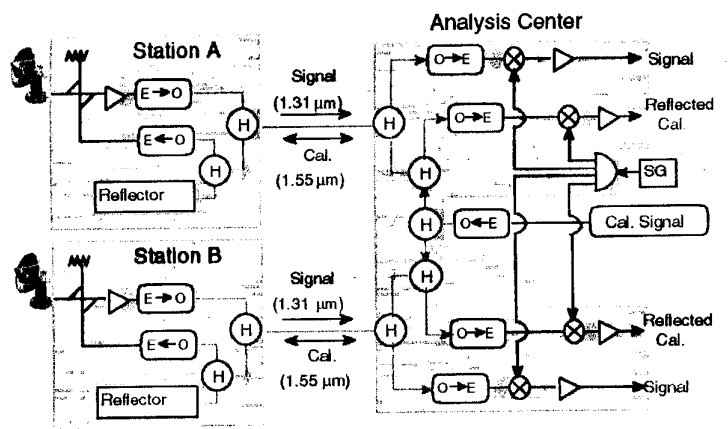


図2 屈折率補正を追加したシステム

る信号に比べ、2倍（往復分）の長さの光ファイバケーブルによる減衰を受けるため、なるべく大きなパワーレベルを維持する必要があるためである。

解析局に戻ってきた遅延校正信号は、電気信号に変換され、天体電波源からの信号と同様に、共通なローカル信号を用いて1F帯の信号に変換される。

こうして得られた2局、2系統の信号から、遅延を求める方法を以下に示す。

3. 遅延校正の原理

図3は、解析局と観測局を行き交う信号を模式的に示したものである。目的信号がX局のアンテナに到達した時刻を T_{SX} 、X局の目的信号が解析局に到達した時刻を T'_{SX} 、時刻 T_0 に解析局で分岐されX局に送られた遅延校正信号が、通常の経路で解析局に戻ってきた時刻を T_{CnX} 、反射して戻ってきた時刻を T_{CrX} とし、波長 $1.31\mu\text{m}$ と波長 $1.55\mu\text{m}$ の光搬送波が、解析局と観測局Xを結ぶ光ファイバケーブルを通過するのに要する時間を、それぞれ $t_{1.31X}$ 、 $t_{1.55X}$ とすると、 T'_{SX} は、

$$T'_{SX} = T_{SX} + t_{1.31X}$$

T_{CnX} 、 T_{CrX} はそれぞれ、

$$T_{CnX} = T_0 + t_{1.55X} + t_{1.31X}$$

$$T_{CrX} = T_0 + 2t_{1.55X}$$

と表される。A、B2局の信号を、相関処理およびバンド幅合成処理⁽²⁾して得られる遅延時間は、目的信号については、

$$(T'_{SB} - T'_{SA}) = (T_{SB} - T_{SA}) + (t_{1.31B} - t_{1.31A})$$

通常の遅延校正信号については、

$$(T_{CnB} - T_{CnA}) = (t_{1.55B} - t_{1.55A}) + (t_{1.31B} - t_{1.31A})$$

反射して戻ってきた遅延校正信号については、

$$(T_{CrB} - T_{CrA}) = 2(t_{1.55B} - t_{1.55A})$$

となるから、目的信号のアンテナ到達遅延時間差 $(T_{SB} - T_{SA})$ は、

$$(T_{SB} - T_{SA}) = (T'_{SB} - T'_{SA}) - \{(T_{CnB} - T_{CnA}) - (T_{CrB} - T_{CrA}) / 2\} \quad (1)$$

のように求めることができる。

解析局内および各観測局内で発生する遅延時間差は、(1)式右辺の各項に関し予め測定しておき、補正を行う。

位相遅延を決定する際に問題となる遅延のAmbiguityは、(1)式右辺に遅延を2で割った項があるため、昨年のシステム同様、RF1周期の1/2、今回の基礎実験の場合約60psecとなり、位相遅延を決定するために必要な群遅延の決定精度は約30psecとなる。

4. 使用可能な光ファイバケーブル長

昨年のシステムでは、光復調器の熱雑音による目的信号のS/N劣化が支配的な要因となり、使用可能な光ファイバケーブル長が約65kmに制限された。今回のシステムでは反射を利用するため、解析局に戻す遅延校正信号は、通常経路の遅延校正信号に比べ2乗倍の減衰を受け、65kmの光ファイバケーブル長では必要な信号レベルが得られない。

遅延校正信号の回線設計から、使用しうる光ファイバケーブルの最大長を見積もった結果を、表1に示す。遅延校正信号を解析局から出力する際の信号レベルは光変調器の入力レベルで制限され、今回用いたオーテル3741光変調器の場合0dBmである。従って、1GHzのRF帯域で10MHzおきのコムパルスを送延校正信号として用いる場合は、遅延校正信号1本あたり-20dBmにレベルを設定する必要がある。一方、通常の2MHz帯域のビデオ帯において適正な遅延校正信号レベルが得られるLNA入力端での遅延校正信号のレベルは-134dBm（システム雑音温度300Kに対し、帯域幅1kHzで10dB超過とした）であるので、この2つの条件を満足する最大の光ファイバケーブル長を、観測局の光方向性結合器の分配比を調整しつつ見積もると、約41kmとなる。この際の観測局の光方向性結合器の分配比は、7:1となる。

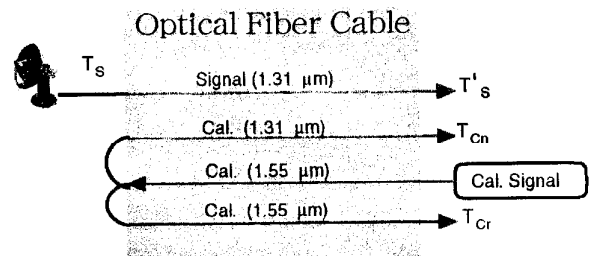


図3 遅延決定概念図

表1 回線設計

(使用する光ファイバーケーブルの最大長の見積もり)

| Reflected Calibration Signal | Loss [dB] | | Power [dBm] | Normal Calibration Signal | Loss [dB] | | Power [dBm] |
|------------------------------|-----------|----------|-------------|--------------------------------|-----------|----------|-------------|
| | Optical | Electric | | | Optical | Electric | |
| P-Cal. Power | | | -20.0 | P-Cal. Power | | | -20.0 |
| O-E, E-O Conversion | | -34.5 | -54.5 | O-E, E-O Conversion | | -34.5 | -54.5 |
| 3 dB coupler | -3.5 | -7.0 | -61.5 | 3 dB coupler | -3.5 | -7.0 | -61.5 |
| Directional Coupler | -3.5 | -7.0 | -68.5 | Directional Coupler | -3.5 | -7.0 | -68.5 |
| Wave Length Divider | -0.5 | -1.0 | -69.5 | Wave Length Divider | -0.5 | -1.0 | -69.5 |
| Optical Fiber Cable | -12.3 | -24.6 | -94.1 | Optical Fiber Cable | -12.3 | -24.6 | -94.1 |
| Wave Length Divider | -0.5 | -1.0 | -95.1 | Wave Length Divider | -0.5 | -1.0 | -95.1 |
| Directional Coupler | -1.1 | -2.2 | -97.3 | Directional Coupler | -9.5 | -19.0 | -114.1 |
| Reflector | -0.5 | -1.0 | -98.3 | Directional Coupler (Electric) | | -20.0 | -134.1 |
| Directional Coupler | -1.1 | -2.2 | -100.5 | | | | |
| Wave Length Divider | -0.5 | -1.0 | -101.5 | | | | |
| Optical Fiber Cable | -12.3 | -24.6 | -126.1 | | | | |
| Wave Length Divider | -0.5 | -1.0 | -127.1 | | | | |
| Directional Coupler | -3.5 | -7.0 | -134.1 | | | | |

表中の Power は電気信号換算の減衰量 (表中の Electric Loss) の積算値。光伝送システムにおける光信号の減衰は、電気信号に換算すると2乗倍の減衰になる⁽³⁾。

Conditions

| | |
|----------------------|---------------|
| Cable Loss (Optical) | -12.3 dB |
| Cable Loss / km | 0.3 dB/km |
| Cable Length | 41 km |
| Distribution Ratio | 0.875 : 0.125 |

5. 基礎実験

遅延校正の有効性を確認するため、基礎的な実験を行った。図4に基礎実験のシステム構成を示す。昨年の基礎実験同様、共通の信号を2つの受信系に与え、異なる長さの光ファイバーケーブルで解析局に伝送して遅延の測定を行った。K-4 入力インターフェース装置⁽⁴⁾の遅延校正信号位相検出機能を使用して、約 400 MHz の帯域で20 MHz おきに位相差測定を行い、最小二乗法により周波数軸上での傾き (遅延) を求めた。観測局で反射されて戻ってくる遅延校正信号については、今回は光ファイバーケーブルによる減衰が小さくS/Nが高すぎるため、1ビットサンプリング後の波形が矩形形状になり K-4 入力インターフェース装置の遅延校正信号位相検出機能では位相が正しく表示されないため、波形が完全な矩形であると仮定して位相の補正を行った。

サンプルとして用いた光ファイバーケーブルは昨年同様3種類4本で、その組み合わせにより得られる4種類のケーブル長差について遅延校正が正しく行われるか実験を行って確認した。結果を表2に示す。表中の誤差は、最小二乗残差から計算した値である。群遅延の決定精度が悪く、しかも誤差の範囲を超えて誤った群遅延が得られてしまった。先にも述べたように、位相遅延の ambiguity は約 30 psec なので、ケーブル長差 0 m 以外は誤った位相遅延が得られてしまうが、図6に示すように位相差の測定値はすべて0度付近に集中しており、得られた群遅延に見合った位相差は得られていない。このことから、得られた群遅延はみかけのもので、ケーブル遅延は正しく補正されたと考えられる。従って、表2には、正しい ambiguity が得られたものとして計算した位相遅延を示した。

図7に、反射光による遅延校正を適用したときとしないときの位相遅延の比較を示した。昨年の結果同様、反射光を用いない場合は、ケーブル長差に比例して補正しきれない遅延が増大しているが、反射光を用いた場合は、ケーブル長によらず正しく遅延校正が行われていることがわかる。しかし、誤差は反射光を用いた方が大きくなっている。これは、反射光による遅延校正信号の位相に対して行った矩形近似の補正 (前述) が適切でなかったためと考えられる。この影響は、光ファイバーケーブルによる減衰が大きい場合は軽減される。また、遅延校正信号のC/Nから見積もられる位相誤差は十分に小さいが、実際に観測される位相誤差は大きく、遅延推定結果に大きく影響を与えている。群遅延が正しく得られない原因もここにあると考えられる。この原因は今のところ不明であるが、メタルケーブルを伝送に用いた場合も同様であることから、光伝送システムに起因する物ではないと考えられる。

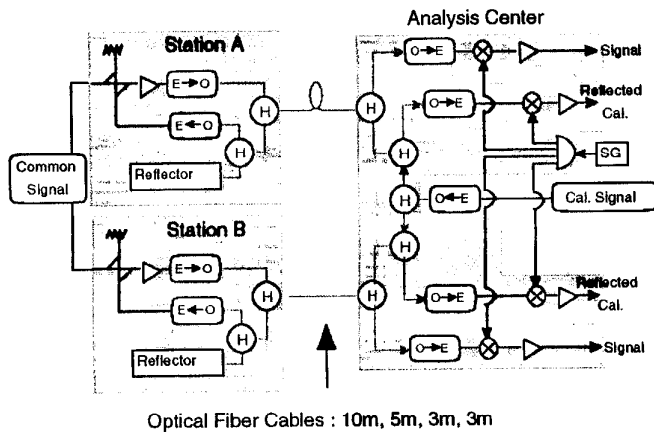


図4 基礎実験システム構成

表2 遅延測定結果

| Cable Length Difference | Delay [psec] | |
|-------------------------|--------------|--------------|
| | Group Delay | Phase Delay |
| 7 m | -54.0 ± 31.9 | -0.33 ± 0.44 |
| 5 m | -94.6 ± 38.1 | 0.39 ± 0.53 |
| 2 m | -33.1 ± 32.4 | -0.95 ± 0.45 |
| 0 m | 7.4 ± 21.5 | 0.10 ± 0.30 |

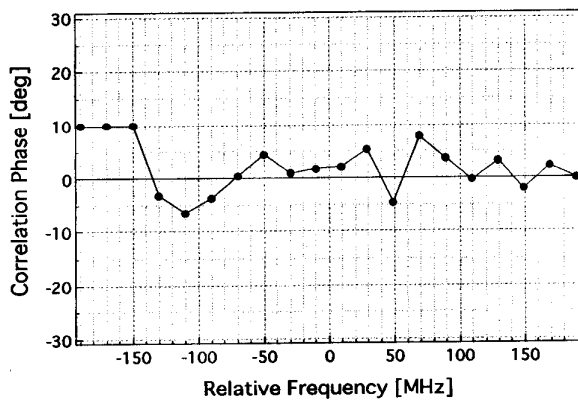


図6 相関位相

両局の信号伝送に5mの光ファイバケーブルを使用した時の相関位相。他のケーブル長の組み合わせの時も同様に、相関位相は0度付近に集中する。

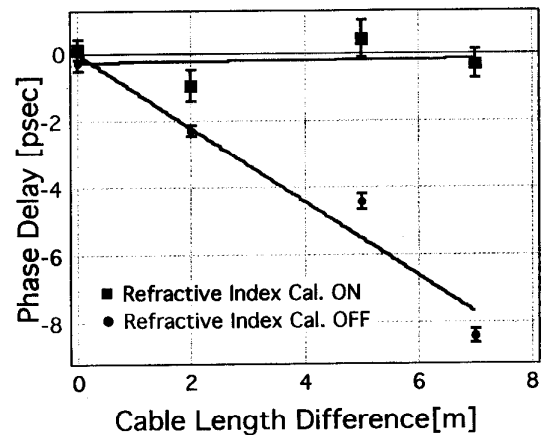


図7 基礎実験結果

6. まとめ

RF光伝送干渉系に反射光を利用した遅延更正文を導入して屈折率の影響を排除する方式の検討、および基礎的な実験を行った。回線設計により使用可能な光ファイバケーブルの最大長は約41kmであることが見積もられた。また、ゼロ遅延のシステムを用いた遅延校正実験から、本方式により屈折率補正が正しく行われることが確認された。

参考文献

- 1) 雨谷他、「RF光伝送干渉計の基礎実験」、標準談話会資料、'97 11月
- 2) 高橋他、「VLBI技術」、オーム社、'97
- 3) 宇田、「レーザと光通信」、丸善、'73
- 4) Kiuchi, H. et. al.; "K-3 and K-4 VLBI Data Acquisition Terminals", J. Comm. Res. Lab., Vol. 38, 3, 1991