

RF光伝送干渉計の基礎実験

時空計測研究室 雨谷 純、国森裕生
時空技術研究室 木内 等

1. データレコーダ、周波数標準のいらぬVLBI

現在、VLBIでは干渉計の各素子で得られた信号のコヒーレンスを保つため、各局に周波数安定度の高い周波数標準（水素メーザ発振器）を備えている。また、アンテナで受信された信号は、周波数変換された後、一旦データレコーダでテープに記録され、解析局に送られる。近年、ATM交換機を利用したリアルタイムデータ伝送⁽¹⁾により、データレコーダ不要のVLBI観測が実現したが、この方式でも周波数変換された信号を伝送するため、周波数標準は各局に備える必要がある。

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れば、データレコーダ・周波数標準を必要としない電波干渉計を構成することができる。この方式では、解析局の基準信号で両局のRF信号を処理するため、基線解析の際の時計パラメータの推定が不要となる他、RF位相を直接比較することにより高い遅延決定精度が得られるので、観測局位置決定精度を従来に比べ格段に向上させることができる⁽²⁾。また、伝送遅延をリアルタイムに校正することにより、共通ローカルの干渉計として積分時間を長くとれるので、大気伝搬特性の研究や宇宙の果てに近い微弱電波源の観測でも威力を発揮できる。

本論文では、RF光伝送干渉計の、ノイズ評価の結果および、基礎実験によるコヒーレンス、遅延安定性の評価、遅延校正方法の検証結果に関し述べる。

2. RF光伝送による電波干渉計の構成

図1にシステムの構成を示す。各局のアンテナで受信された信号は低雑音増幅された後、光変調器で1.31 μmの光信号に変換され、光ファイバーにより解析局に送られる。解析局では、光復調器を用いて光信号から各局のRF信号を復元し、共通のローカル信号でIF信号に変換する。IF信号は、さらにビデオ変換、デジタル化された後、相関処理され遅延時間が決定される。

伝送路の遅延の補償は、解析局から送られるRF帯の校正信号を用いて行う。校正信号はRF帯のフィルターを通過した後、光変調器により1.55 μmの光信号に変換される。光に変換された校正信号は光分配器により分配され各観測局に送られる。観測局では、送られてきた光信号から、光復調器により校正信号が再生され、低雑音増幅器入力端から、受信系に注入される。校正信号は、アンテナで受信された信号と共通の経路を通過して、解析局に送り返される。これにより、観測局・解析局間の光ファイバーの遅延差の変化を検出することが可能となる。また、電気回路部分の遅延差を別途校正することにより、伝送路の遅延差の絶対値を決定することが可能となる。

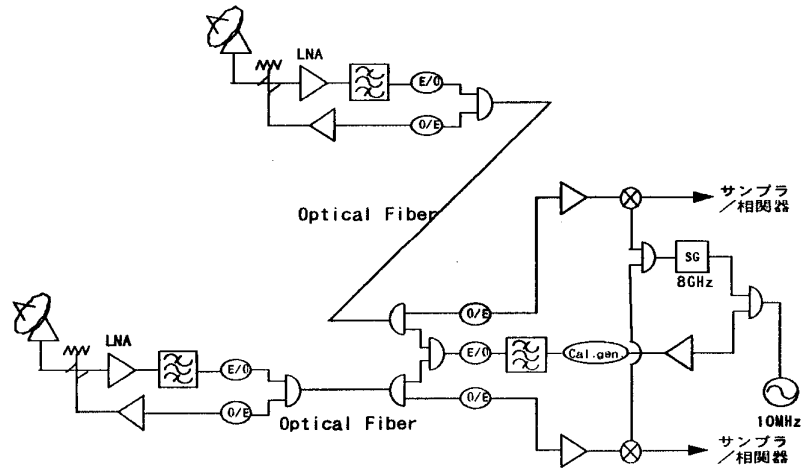


図1 システム構成

3. 遅延校正の原理

図2に、遅延測定のご概念図を示す。各局で受信された目的信号がサンプルされる時刻を、目的信号が観測局1の基準点に到達した時刻を基準として表すと、

$$T_{obs1} = T_0 + t_{a1} + t_{RX1} + t_{cable1}(1.31\mu m) + t_{acq1}$$

$$T_{obs2} = T_0 + \tau_g + t_{a2} + t_{RX2} + t_{cable2}(1.31\mu m) + t_{acq2}$$

となる。両局の差をとることにより、目的信号の到達時間差 ($T_{obs2} - T_{obs1}$) が得られる。

$$T_{obs2} - T_{obs1} = \tau_g + (t_{a2} - t_{a1}) + (t_{RX2} - t_{RX1}) + (t_{cable2}(1.31\mu m) - t_{cable1}(1.31\mu m)) + (t_{acq2} - t_{acq1}) \quad (1)$$

解析局から送出された校正信号は光ファイバーによって各局に供給され、校正信号注入点から目的信号と同一の経路を通過して解析局に送り返される。校正信号が検出される時刻を、信号経路を通過する時間を積算して求めたのが次式である。

$$T_{cal.obs1} = T_{cal.0} + t_{cal.TX1} + t_{cable1}(1.55\mu m) + t_{cal.RX1} + t_{RX1} + t_{cable1}(1.31\mu m) + t_{acq1}$$

$$T_{cal.obs2} = T_{cal.0} + t_{cal.TX2} + t_{cable2}(1.55\mu m) + t_{cal.RX2} + t_{RX2} + t_{cable2}(1.31\mu m) + t_{acq2}$$

目的信号同様、両局の差をとることにより、到達時間差($T_{\text{cal.obs2}} - T_{\text{cal.obs1}}$)が求められる。ここで、ケーブルの物理的長さを L 、各波長における屈折率を $N(\lambda)$ 、光速を C すると、

$$t_{\text{cable}}(\lambda) = N(\lambda) \cdot L / C$$

と表されるから、

$$\begin{aligned} T_{\text{cal.obs2}} - T_{\text{cal.obs1}} = & (t_{\text{cal.TX2}} - t_{\text{cal.TX1}}) + (t_{\text{cal.RX2}} - t_{\text{cal.RX1}}) + (t_{\text{RX2}} - t_{\text{RX1}}) \\ & + (1 + N(1.55\mu\text{m})/N(1.31\mu\text{m})) \cdot (t_{\text{cable2}}(1.31\mu\text{m}) - t_{\text{cable1}}(1.31\mu\text{m})) \\ & + (t_{\text{acq2}} - t_{\text{acq1}}) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、両局の差を Δ で表し、(1)式右辺のケーブルおよびアンテナ以外の項を ΔT_{sys} 、(2)式右辺のケーブル以外の項を $\Delta T_{\text{cal.sys}}$ 、屈折率の補正項 $(1 + N(1.55\mu\text{m})/N(1.31\mu\text{m}))$ を C_N で表すと、(1)、(2)式はそれぞれ、

$$\Delta T_{\text{obs}} = \tau_g + \Delta t_a + \Delta t_{\text{sys}} + \Delta T_{\text{cable}}(1.31\mu\text{m}) \quad (1')$$

$$\Delta T_{\text{cal.obs}} = \Delta T_{\text{cal.sys}} + C_N \cdot \Delta T_{\text{cable}}(1.31\mu\text{m}) \quad (2')$$

となる。これから、幾何学的遅延時間 τ_g は、

$$\tau_g = \Delta T_{\text{obs}} - \Delta t_a - \Delta t_{\text{sys}} - (\Delta T_{\text{cal.obs}} - \Delta T_{\text{cal.sys}}) / C_N \quad (3)$$

と求められる。

Δt_{sys} と $\Delta T_{\text{cal.sys}}$ に関しては、時刻オフセットを推定する場合は、変化分のみ必要となるので、十分小さく無視できると考えられるが、時刻オフセットを推定しない場合は、各局に配置するシステムを事前に解析センターに持ち寄って校正する必要がある。 Δt_a に関しても同様に、時刻オフセットを推定する際は問題にならないが、推定しない場合は何らかの方法で予め求めておく必要がある。

通常行われているようにバンド内位相の傾きから遅延を決定する場合(バンド幅合成法)と異なり、RF位相から直接遅延を

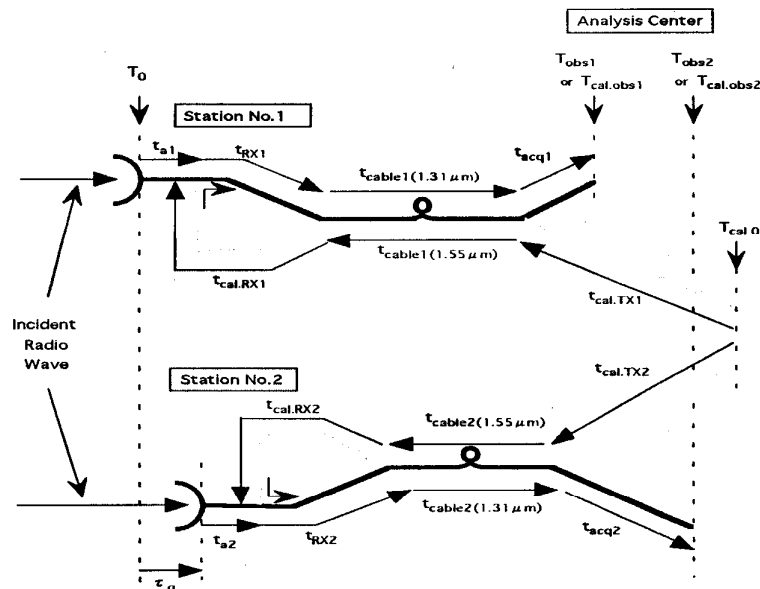


図2 目的信号の遅延測定概念図

- n : 観測局を示すインデックス
- T_0 : 目的信号が観測局1の基準点に到達した時刻
- τ_g : T_0 に観測局1の基準点を通じた目的信号と同一の波面が、観測局2の基準点を通ずるまでに要する時間
- $T_{\text{obs } n}$: 受信された目的信号がサンプルされた時刻
- $t_{a n}$: 目的信号が基準点を通してから校正信号注入点に達するまでに要する時間
- $t_{\text{RX } n}$: 目的信号または校正信号が校正信号注入点を通してから光ケーブル入力端に達するまでに要する時間
- $t_{\text{cable } n}(\lambda)$: 目的信号の光搬送波($\lambda=1.31\mu\text{m}$)または校正信号の光搬送波($\lambda=1.55\mu\text{m}$)が光ケーブルを通するのに要する時間
- $t_{\text{acq } n}$: 目的信号または校正信号が光ケーブルを出てから解析系を通するのに要する時間
- $T_{\text{cal } 0}$: 校正信号が校正信号分岐点を通する時刻
- $T_{\text{cal.obs } n}$: 校正信号がサンプルされた時刻
- $t_{\text{cal.TX } n}$: 校正信号が校正信号分岐点を通してから光ケーブル入力端に達するまでに要する時間
- $t_{\text{cal.RX } n}$: 校正信号が光ケーブルを出てから校正信号注入点に達するまでに要する時間

求めようとする場合（位相遅延測定）は、両局に独立に付加される位相の影響が問題となる。本方式では各遅延差の差をとる形になっているため、付加位相の影響は相殺され τ_g には影響を及ぼさない。

実際に(3)式を計算する際は、各遅延時間差を求めてから計算するのではなく、各遅延差を反映した位相差のスペクトルを測定し、その各周波数の位相差毎に上式の計算を行い τ_g を反映した位相差のスペクトルを求め、その後バンド幅合成によって τ_g を求める方が、位相遅延測定に必要なアンビギュイティの同定をする際に都合が良い。

なお、今回採用した双方向伝送方式による伝送路遅延の補償では、光ファイバー部分のみの遅延変化しか補償されない。光ファイバー両端の電気・光回路部分で最も遅延変動が大きいと考えられるのは光復調器で、4515Aの場合3.5ps/°Cとなっているが、温度補償により1ps以下の変動に抑えることができると考えられる。

4. 使用可能なケーブル長

図3に、光伝送系で発生するノイズの光伝送系入力端換算値を示す。光ファイバーによる長距離伝送の場合、S/N比を決定する要因としては光復調器の熱雑音が支配的で、光ファイバーによる光信号強度の減衰によりS/N比が劣化する。

オーテル社の3541A光変調器と4515A光復調器を使用した場合、信号の帯域幅を1GHz、光伝送系入力端での総信号電力を0dBm、光伝送系のS/N許容値を10dB（1割のノイズの増加を許す。すなわち相関振幅は約1割低下）とすると、図に示すように伝送路の減衰量は約20dBまで許されることがわかる。光ファイバーケーブルのロスをとると使用可能な光ファイバーの最大長は約65kmとなる。

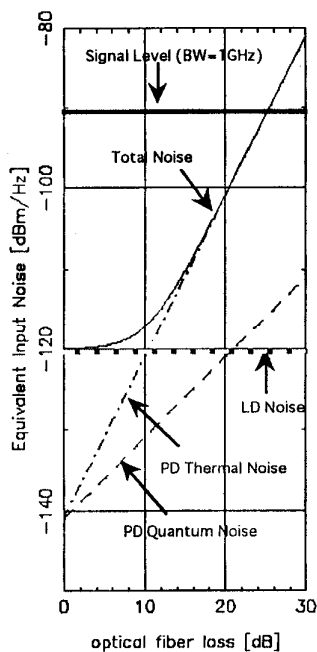


図3 光伝送系で発生するノイズ

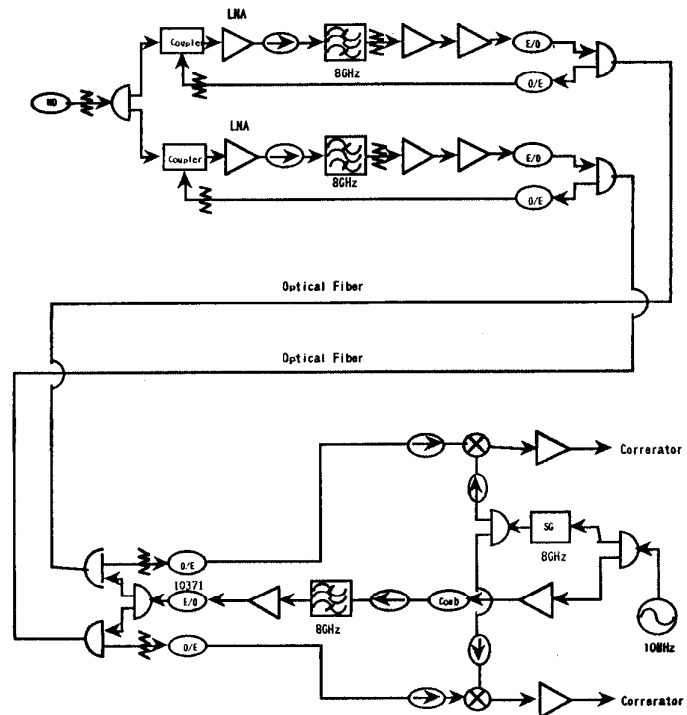


図4 基礎実験システム構成

5. 基礎実験

今回行った基礎実験の構成を図4に示す。アンテナからの信号の代わりに、2つの受信系に共通の信号（ノイズまたはcombパルス）を供給した。両受信系で用いたケーブルの長さや、アンプの種類はすべて同じものを用いた。従って、(3)式の $\Delta\tau_a$ は0であり、 τ_g も0となる。IF帯に変換された信号は、K4ビデオ変換器およびK4入インターフェース⁽³⁾を用いて位相測定を行い、相互相関はKSP相関器⁽⁴⁾を用いて処理した。

a. コヒーレンス

ノイズダイオードを用いて2つの受信系に共通のノイズを供給し、KSP相関器を用いて相関振幅を測定した。光伝送系をすべて普通の同軸ケーブルで置き換えたシステムで得た相関振幅との比較を表1に示す。今回使用した基礎実験の構成では、観測される

表1 相関振幅の比較

周波数 [MHz]	相関振幅[%]	
	光ファイバー	同軸ケーブル
8100	5.657	5.138
8180	6.344	4.534
8340	6.544	6.537
8500	5.579	6.008

遅延がほぼ0、遅延変化率も0となるため、目的外の信号の相関が大きく正確な振幅の測定ができないが、1ビットサンプリングによる非線形効果⁹⁾がでない範囲でなるべく強い相関を用いて測定を行った。結果に大きな違いは見られない。カタログ値(図3)から、光伝送系で発生する雑音による相関振幅の低下は小さいことが見積られるが、結果はそれを裏付ける(なお、今回のシステムでは入力光信号のレベル調整のため5dBの光アッテネータを挿入している)。また、光伝送系で発生する位相ゆらぎによるコヒーレンスの低下も、相関振幅を低下させる程には大きくないことがわかる($\Delta\phi \ll 1$ rad)。

b. 遅延の変化

両局システムに注入した同一のcomb信号の位相差をK4入力インターフェースのPCALモニターで測定した。図5に観測された位相差の長期変動を示す。(a)は両局システムとも光ファイバーを用いた結果で、(b)は片方のシステムの信号伝送に同軸ケーブルを用いた結果である。両局システムとも同一の温度環境下(実験を行った部屋の温度の変化はP-Pで1度程度)で行った結果であるが、(a)、(b)どちらも12時間にわたり、群遅延(各周波数間の位相差変化)にもRF位相差にも、大きな変動は見られない。RF位相差の変化はどの周期成分も高々振幅1度程度で、これは約0.3psecに相当する。

この結果から、解析局に置くシステムは、p-p 1度程度で温度制御を行われた部屋に置けば、問題ないと考えられる。観測局のシステムについては、実際には各局で独立な温度環境下に置かれるため、今後、恒温槽用いた実験を行って温度係数を評価する必要がある。

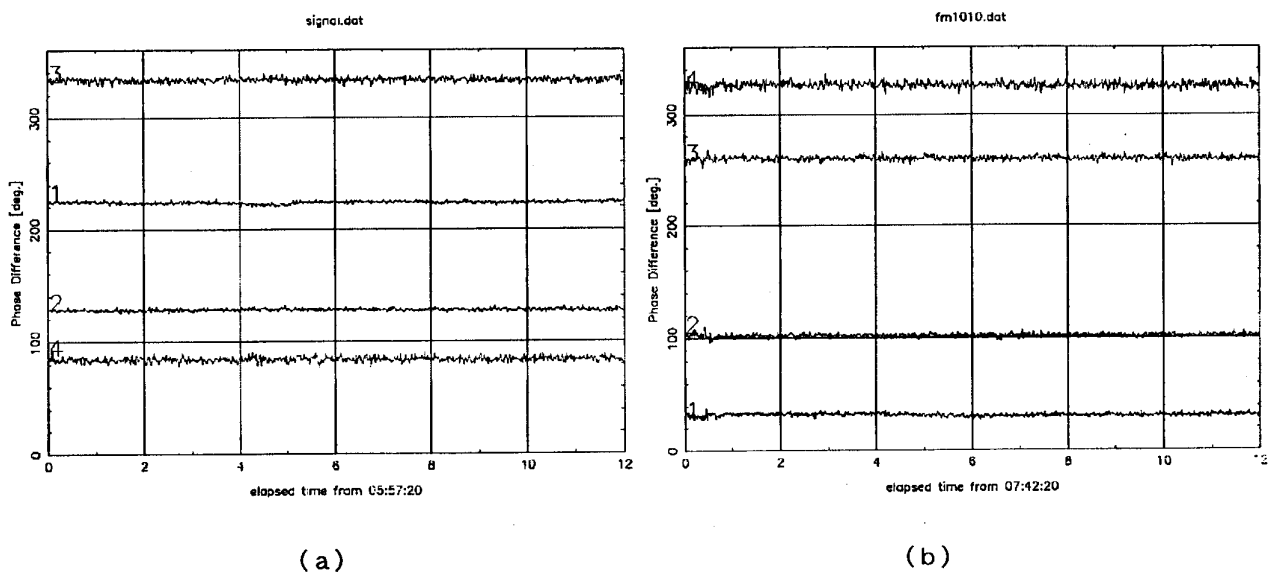


図5 両局の信号位相の差の時間変化

(a) 両局の信号とも光ファイバーで伝送、(b) 片方を光ファイバー、もう片方を同軸ケーブルで伝送。横軸の単位は時間。データの間隔は1分。図中の1~4はそれぞれ、8100MHz、8180MHz、8340MHz、8500MHzに対応。

c. 遅延校正法の検証

3. で述べた遅延校正の方法の検証を行った。先に述べたように、ノイズの相関をとる方法では正確な遅延測定が期待できないため、同一のcombパルスを両方の受信系に供給し、(3)式の Δt_{obs} を測定した。校正信号による校正は、実際には目的信号の遅延測定と同時に行うが、今回の実験では目的信号、校正信号ともcombパルスを用いることになるため、同時に行うことができない。そのため目的信号の遅延測定(Δt_{obs})と校正信号による遅延校正($\Delta t_{cal. obs}$ の測定)は別に行った。また、 Δt_{sys} と $\Delta t_{cal. sys}$ は、両局のケーブルを入れ替えて測定し、入れ替える前の測定値との和をとり2で割ることにより求めた。各測定は、K4入力インターフェースのPCAL信号検出器を用いて行った。IF周波数250MHzから500MHzまで10MHzおきに変化させ、各チャネルの位相を交互に1秒おきに10回測定し、平均を取った後、差をとった。

結果を表2に示す。光ファイバーは10m 1本、5m 2本、3m 1本を用意し、表に示す4つの組み合わせで測定を行った。2つの受信系に共通の信号を入力しているため τ_g は0になるはずであるが、いずれの場合も100psec以下の τ_g が得られ、2.で述べたケーブル遅延の補正がうまく行えることが実証された。

τ_g はバンド幅合成法と、位相遅延測定との2種類を試みた。表に示すように位相遅延測定で求める方が、バンド幅合成法で求めるのと比べ二桁以上決定精度が向上しているのが分かる。

位相遅延測定から求めた光ファイバー系の τ_g は、ケーブル長差に比例して増加する傾向が見られる(図6)。同じ方法を、光伝送系のかわりに同軸ケーブルを使ったシステムで測定した結果も表2に示した。装置の都合で同軸ケーブルのシステムは双方向の遅延補正ではなく単方向の遅延補正であるため、単純には比較できないが、同軸ケーブルのシステムではケーブル長差とRF位相からもとめた τ_g の間に有為な相関は見られない。光ファイバー系の τ_g がケーブル長差に比例して増加する原因としては、 C_N の値のあやまりが考えられる。今回用いた光ファイバーの屈折率はメーカーからの情報で、 $N(1.31\mu\text{m})$ が1.44692、 $N(1.55\mu\text{m})$ が1.44402で、これから得られる C_N は1.997996となるが、今回の結果から逆算すると1.9983程度となる。

なお、位相遅延測定で遅延を決定する際には、バンド幅合成法の結果から、位相のアンビギュイティを見積もるが、このアンビギュイティはRFの半周期、約60psecである。これは双方向遅延補正をおこなうため、校正系の遅延を C_N (≈ 2) で割るためである。今回の場合、表からわかるように光伝送系ではアンビギュイティを同定するにたるバンド幅合成法の遅延決定制度が得られているが、実際には4つの測定のうち2つでアンビギュイティの同定に失敗している(表中の、*をつけた観測)。同軸ケーブルでの測定は双方向補正をおこなっていないので、アンビギュイティは倍の約120psecである。

6. まとめ

RF信号を光ファイバーを用いて伝送する電波干渉計に関し、検討を行った。その結果、使用しうる光ファイバーの長さは約65kmであることが分かった。

基礎的な実験を行い、a)光伝送系を用いたことによる相関振幅の低下は認められないこと、b)長時間の遅延変動は、2つの受信系を同じ温度環境下(P-P1度程度)に置く限りにおいては、十分な安定度(0.3psec以下)を持っていること、c)今回提案した遅延校正方法が正常に機能し、バンド幅合成法のみならず、位相遅延測定もうまく行えることがわかった。

しかしながら、今回行った遅延校正の方法は2波長の光搬送波を用いるため、屈折率比が問題となる。何らかの方法で使用しうる光ファイバーの2波長の屈折率比を測定するか、同一の波長を用いた双方向伝送を行う必要がある。

また、実際の長基線干渉系では、目的信号が電離層等、波長分散のある媒質を通過してくるため、位相遅延と群遅延が一致しなくなってくるので、位相遅延測定は難しくなることが予想される。

今後、このシステムを実際にアンテナに組み込んで、遅延決定、局位置決定を行い、本システムの有効性を確認する実験を行いたい。

7. 謝辞

光伝送系のノイズ解析に関し、住友大阪セメントの武田氏、菊池氏に助言をいただきました。また、相関処理解析に関し、関東支所近藤主任研究官の協力を得ました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 今江理人他、「KSPでの実時間VLBIシステム概要」、通総研季報、Vol.42,1,1996
- 2) Heki,K.,;"Three Approaches to Improve the Estimation Accuracies of the Vertical VLBI Station Positions", J. of Geod. Soc. of Japan, Vol.36, 3, 1990
- 3) Kiuch,H. et.al.;"K-3 and K-4 VLBI Data Acquisition Terminals", J.Comm.Res.Lab., Vol38, 3, 1991
- 4) 木内 等他、「相関処理装置」、通総研季報、Vol.42,1,1996
- 5) Vleck,V. et.al.;"The Spectrum of Clipped Noise", Proc. IEEE, Vol.54, 1, 1966

表2 遅延測定結果

ケーブル種別	ケーブル長差	τ_g [psec]	
		(バンド内位相)	(RF位相)
光ファイバー	7m	-23.1 ±21.6	-10.77 ±0.19
光ファイバー	5m	-78.0 ±25.1	-7.16 ±0.23 *
光ファイバー	2m	-25.8 ±17.2	-3.79 ±0.15
光ファイバー	0m	-50.5 ±25.8	-0.40 ±0.23 *
同軸ケーブル	6m	1.2 ±48.7	-0.61 ±0.44
同軸ケーブル	0.3m	-33.7 ±45.6	-0.20 ±0.41
同軸ケーブル	0m	20.1 ±25.7	-0.01 ±0.23

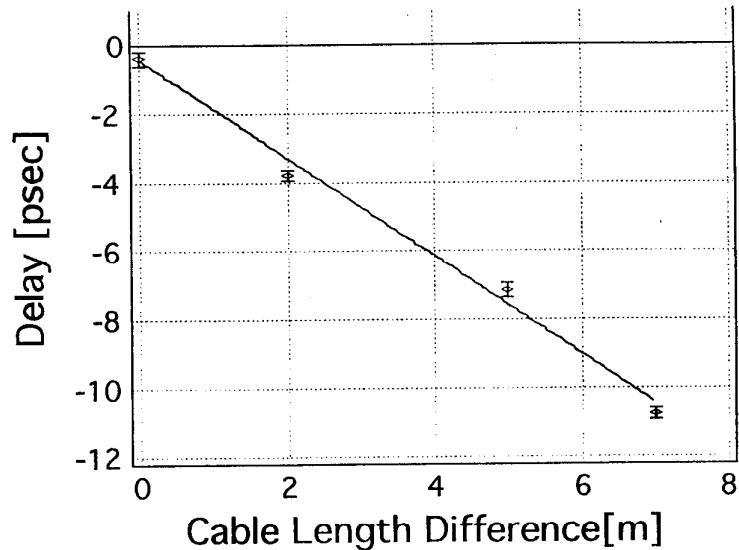


図6 観測遅延量のケーブル長差依存性