

測宙 VLBI

藤沢健太 (山口大学)

(1) 測宙 VLBI

測宙 VLBI とは、測地 VLBI 的な技法を人工天体に応用することで、人工天体の精密な位置の決定を行うというものである。その基本的な方法は地球局から探査機局に人工信号を送信し、探査機局は受信した信号をトランスポンダで地球へ送信する。地球局は受信した信号と送信した信号の相互相関をとり、これから遅延時間を測定する。この遅延時間は地球局と探査機局の距離を表し、測地 VLBI の精度を達成できれば、探査機までの距離測定精度は 3cm となる。仮に 2 天文単位を絶対値 3cm で測定できれば、その相対精度は 10^{-13} に達する。これは惑星探査機の距離測定 (R&RR 方式) で実現されている精度 (数m) より 2 桁高精度である。

10^{-13} の超高精度探査機位置測定によって、天文学および物理学に寄与し、新たな学問を開拓できる可能性がある。例えば太陽系の重力場の精密測定、天文単位の永年増加の検証、パイオニア・アノマリー、一般相対論の検証 (シャピロ遅延、他)、重力レンズ効果などが考えられる。パルサーや重力波などの天体・現象の研究にも関与する可能性がある。

(2) 基礎実験

2-1. 基礎実験の方針

測宙 VLBI の実現には人工信号の VLBI 観測による遅延時間測定が必要であり、そのための基礎実験を行っている。

この実験では人工信号として、数本の CW 信号を用いている。CW を用いることで S/N を極限まで高め、太陽系全域でこの方式が利用できるようにするためである。この送信信号およびそのスペクトルを次の式で表す。

$$x(t) = \sum_i a_i e^{2\pi f_i t + i\delta_i}$$
$$X(f) = \sum_i A_i \delta(f - f_i) e^{i\delta_i}$$

これを遅延時間 τ で受信した信号とそのスペクトルは

$$y(t) = \sum_i b_i e^{2\pi f_i (t+\tau) + i\delta_i}$$
$$Y(f) = \sum_i B_i \delta(f - f_i) e^{i\delta_i + 2\pi f_i \tau}$$

となる。両者の相互相関は

$$C_{xy}(f) = X(f)Y^*(f) = \sum_i A_i B_i \{\delta(f - f_i)\}^2 e^{-2\pi f_i \tau}$$

であり、周波数に対する位相の変化率 (位相傾斜) が遅延時間に比例している。これが測地 VLBI における基本的な測定量なので、この値を人工信号でも測定できることを検証することから実験を開始した。実験項目は

1. ノイズ重畳複数 CW 信号を生成、サンプリング、FT、スペクトル・位相を得られることを実証
2. 相互相関を計算し、位相差・位相傾斜を測定
3. 測定システムの時間安定度を測定
4. 送受信間距離を変化させ、位相傾斜=遅延時間が変化することを実証
5. アンテナを用いて送受信間距離をダイナミックに変化

などである。今回は 3 まで行った結果を報告する。

2-2. 実験回路

図 1 に実験回路の写真を示す。CW 信号の入力が 4 箇所、そのままの出力 (模擬送信信号)、ノイズを重畳した出力 (模擬受信信号) がそれぞれ 1 箇所ある。この出力をそれぞれサンプリングし、相互相関を調べる。図 2 は実験を行っている様子である。4 本の CW 信号を出力する信号発生器、実験回路、出力信号をサンプリングするサンプラ及び PC が 2 系統ある。サンプラには K5/VSSP32 を用いた。また全システムを同期させるためにルビジウム周波数標準及び信号分配器を用いた。模擬受信信号はサンプラに入力する前に約 30m という長い同軸ケーブルを通した。遅延時

間の測定によって約 30m というケーブルの長さが測定されることが期待される¹。

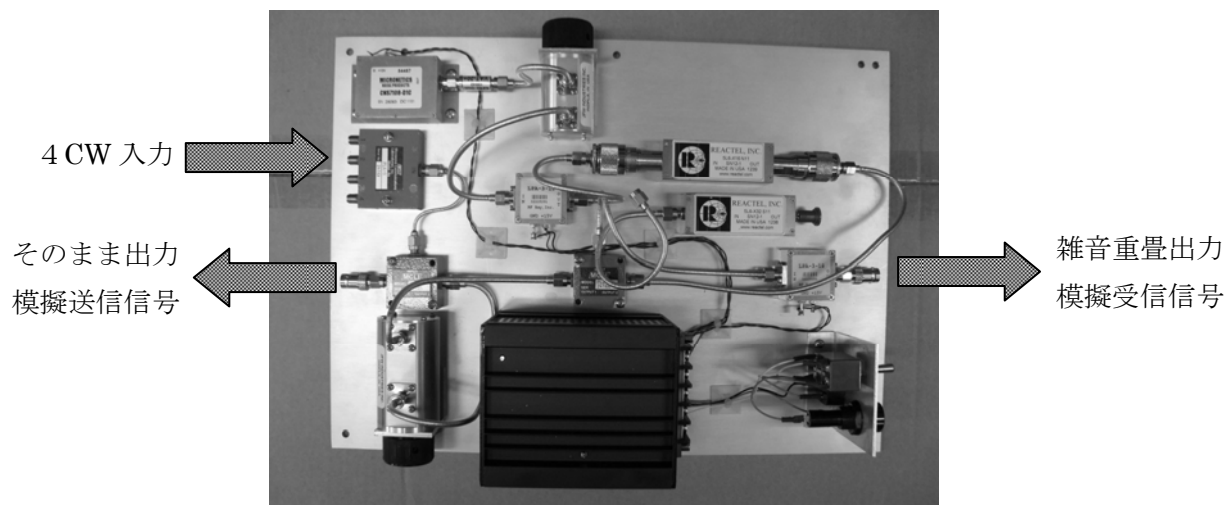


図 1. 実験回路

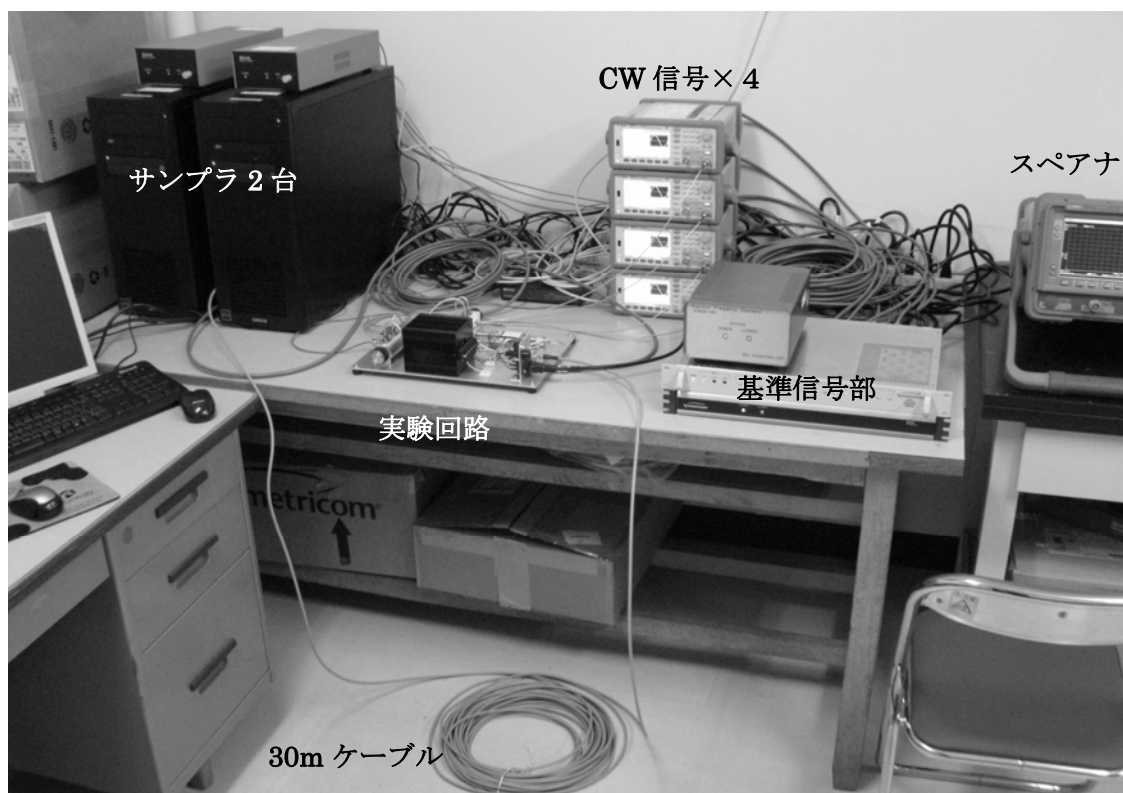


図 2. 実験の様子

¹ ケーブル内では伝送速度が遅くなるため、遅延時間は大きくなり、真のケーブル長より長い値が測定される。一方、模擬送信信号もサンプラに届くまでに伝送時間がかかるため、この分は遅延時間が短くなる。

2-3. 実験

図3に実験で用いた信号のスペクトルを示す(模擬受信信号)。4本のCWはそれぞれ1MHz付近に約100kHz離れて2本、7MHz付近、15MHz付近にそれぞれ1本設定した。周波数は無理数に近い値としてサンプリングにおけるエイリアシングを避けた。低周波数側の2本が接近しているのは 2π 不確定性を避けるためである。この信号のS/Nは5~10、周波数帯域幅は約14MHz、分光点数は32768であり、積分時間は5秒とした。これから伝播長の推定精度は約7mmと予想される。

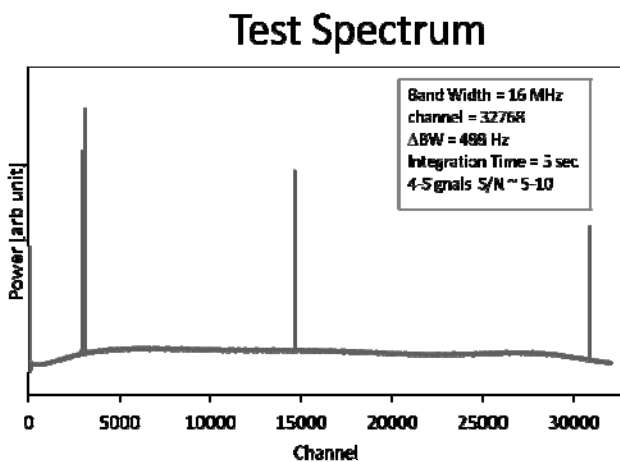


図3. 実験に用いたスペクトル

実験の結果、得られた位相傾斜を図4に示す(2π 不確定性は手作業で除去した)。ほぼ直線的な位相傾斜が得られた。これを一次関数で近似し、得られた位相傾斜(0.723713 rad/MHz)から遅延時間を推定すると0.115183 μ secとなる。これを伝播長に変換すると34.55497 mとなる。

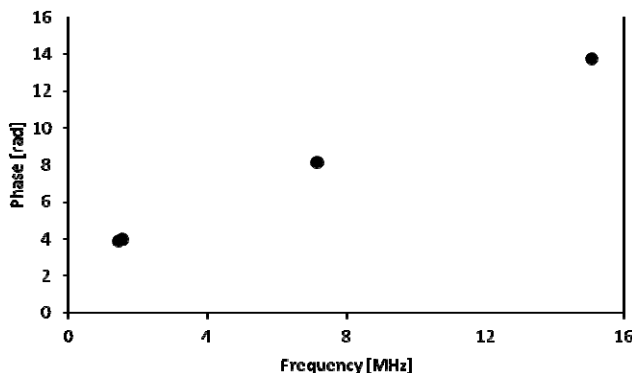


図4. 測定された位相傾斜

伝播長の測定誤差を調べるために、同様の測定を1分間隔で5回、繰り返した。5回の測定で得られた伝播長を時間に対して図示したのが図5である。

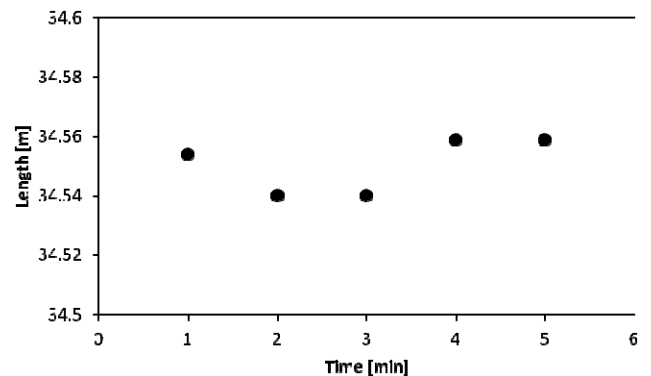


図5. 測定された伝播長の時間変化

5回の測定の平均値は34.55105 m、標準偏差は8.4 mmであった。これは予想された伝播長と推定精度にほぼ一致した。この結果は、CW信号を用いて測地VLBI的な手法を使うことが可能であり、測宙の所期の精度を実現する上で原理的な支障はないことが示された。

3. 今後の展望

今回の実験では最小限の基礎実験しか行っていない。引き続き、実験項目4および5を実施することが必要である。また、絶対値計測のための校正方法の確立(今回は相対測定のみ)も必要である²。

また測宙VLBIが意義のあるものとなるためには、良いアプリケーションが必要である。特に天体物理的な応用として、確固とした目標を設定できることが望ましい³。

最初に述べたとおり測宙VLBIは探査機のナビゲーション技術の一つとして考えられる。また今回の実験から明らかなように、この手法は単に距離を測るだけでなく、探査機局に精密な時刻を伝送する技術でもある。JAXAおよびNICTとの共同研究として、測宙VLBIを発展させる方向を模索する必要があると考えている。

² 秋山氏のコメント。

³ 平林氏のコメント。