

VLBI 国内基礎実験を終えて

川 尻 轟 大*

はじめに

我が国初の VLBI 国内基礎実験が鹿島（電波研鹿島支所 26m アンテナ）——横須賀（電々公社横須賀通研 12.8 m アンテナ）間で行われてから早くも一年になんなんとしている。これまで電波研の実験システムや実験結果については一部研究会集録や他誌にも紹介してきたが、天文月報編集子の要望に応じて改めて紹介させて頂く。

「VLBI」という言葉は天文月報の読者にはもう市民権を得ていることであろう。既に本誌 1975 年 3・4 月号の土屋・松波・中島氏の記事、それに続く平林氏の記事と VLBI の何たるかの紹介記事には事欠かない。ここではこれらの立派な解説記事と重複するような理論的記述及び歴史的事実は省略させて頂き専ら我々の基礎実験の紹介にあてたいと思う。

VLBI の“定義”についてはこれまで各アンテナ毎に独立なローカル周波数と時刻をそれぞれの原子標準から供給するシステムと考えられてきた。その際記録方式は、当初からの磁気テープ記録方式の外、最近ではカナダの CTS 衛星を使った実験の如く、VLBI データを衛星経由で他方に集め、直ちに相関をとる方法が実行され早くも実験結果の速報が出ている。また衛星の進歩は上述の“定義”すら古いものにさせ、ローカル周波数や時刻の供給をも一つの原子標準に統一することが可能になりつつある。これらの進んだシステムに比較すれば我々の行った実験システムはほんの初歩或いは寄せ集めといえるかもしれないが、今後の発展の参考になれば幸いである。

1. VLBI 技術のよいところ

それではこのような VLBI 技術がもてはやされる理由は何であろうか。これはやはり初期からの天体電波源の分解という天体物理的応用から、ここ数年の間、アンテナ間に到達する電波の遅延時間を超精密に測定することによる、静止衛星の軌道決定、測地測量や地殻変動測定への応用等が行われるようになったからであろう。この他、地球自転の不均一性や極運動の検出、時刻同期実験への応用も考えられており、最近では巨大地震の原因と思われる大陸移動の時間的割合や大陸相互間の関係位置確認も可能と言われ注目を集めている。

それでは、超精密な、2 アンテナ間の遅延時間はどのようにして決まるのであろうか。

一般にバンド幅 B (Hz) のランダムノイズを二アンテナで受け相関させた場合、 $1/B$ 程度の遅延時間決定精度を与える。しかしこれでは測地的精度として不十分なので次の二つの方法が使用されている。

まず我々が今回行ったように、実験のデータ処理の最初の段階で得られる相互相関関数 $R(\tau)$ (但し τ は求める遅延時間を与える時間変数) をフーリエ変換し、周波数の関数として表わし、これを基にバンド幅 B (Hz) 内でのクロスフェーズスペクトルを求める。この勾配即ち $d\Phi/d\omega$ (Φ : クロスフェーズ, ω : 角周波数) が丁度時間の次元を表わし、これが超精密な遅延時間 $\Delta\tau_g$ を与える。尤もこれに、予め理論的に遅延時間を計算し、サンプルレートでできる最小時間単位 (今回は 250 nsec) で表わした時間 (これをピットシフト τ_i と呼ぶ) を加えたもの、 $\tau_i + \Delta\tau_g$ が求める遅延時間となる。

二番目の方法は一般的にバンド幅 B を広げることである。といっても記録する磁気テープに制限があるので一挙に広げるわけにはいかない。そこで比較的狭い B (Hz) (今までの例では 360 KHz (米国の Mark I) 又は 2 MHz (同じく Mark II, III) が使用されている) を周波数的に“適当に”離して配列し、それぞれのチャンネルを切替えて磁気テープに記録させる。こうして両端 (数十 MHz 乃至 100 MHz 以上) のバンド幅分の一の遅延時間決定精度を出そうという方法である。後者の方法は電波星を使っての測地的応用例として既に米国のヘイスタック-ゴールドストーン間の実験で成功を納めている。

2. 今回の基礎実験用システム

今回の VLBI 基礎実験用システムを開発するに当たり現在米国立電波天文台や Cal Tech を中心に使用されている Mark II システムを一応の参考にした。Mark II システムについての記述は電波研季報の拙文 (Vol. 20, No. 108) を参照して頂きたい。以下に我々の今回のシステムの各部の特徴を図 1 に従って説明しよう。

(1) アンテナ, 給電系, ローカル系

VLBI という実験は、ローカル周波数の“完全に”合った受信系を持つ二つ以上の大型アンテナの組合せがそろって初めて成立する。鹿島の 26m アンテナの場合、VLBI 用の周波数としては、これまで行ってきた ATS-1 号用の 4GHz 帯のみであった。さて、この宇宙通信用の周波数を使い、且つ電波星を追尾できるようなプログラム追尾装置つき大型アンテナとなると極く限られてしまう。今回電々公社横須賀通研の方で都合をつけて下

* 郵政省電波研鹿島支所

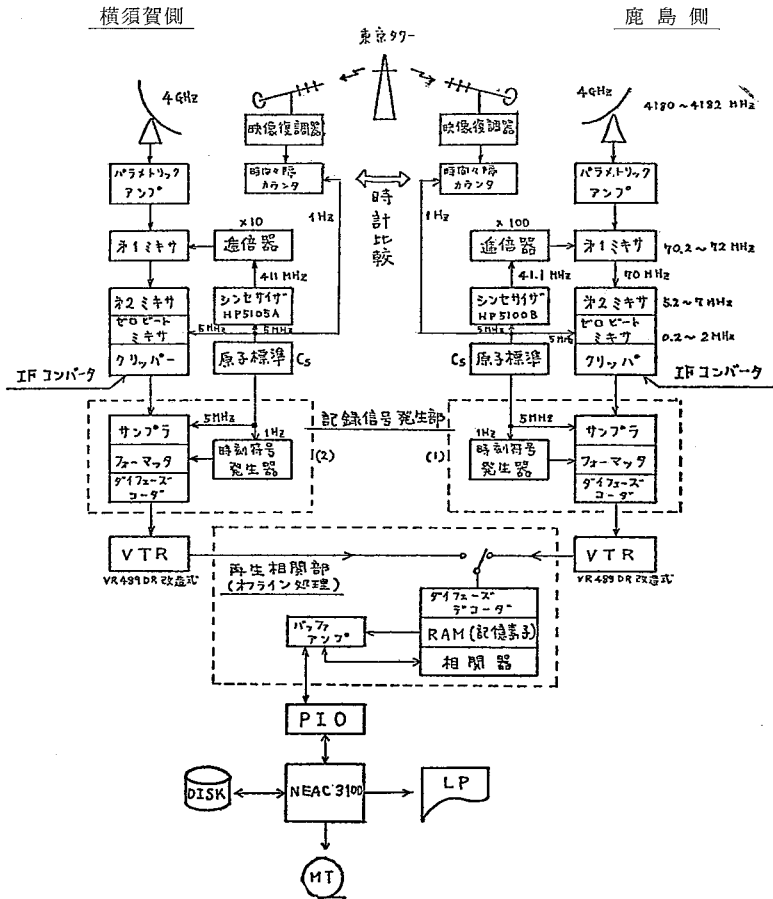


図 1 VLBI 国内基礎実験システムブロック図

さるとのことで、昭和51年2月船川前支所長共々横須賀通研へお邪魔して御協力をお願いしたわけである。

VLBI 実験では電波の位相が特に問題となるので、通常の電波天文観測のように自乗検波して位相を消すようなことをせず、何段かのローカル系によりビートダウンし、最終段のゼロビート、ミキサで磁気テープに記録可能なビデオ帯までおとす(我々の場合0.2~2 MHz)。このようなローカル系の周波数はすべて Cs 原子標準の 5 MHz から作った。VLBIではこのローカル系の安定度が積分時間(相関をとる時間範囲)を左右し(波の位相が 1/10 波長乃至 1 ラジアン程度変化する時間範囲のみ積分可能)、従って最終的なデータの精度に直接影響する。

我々はまず IF コンバータ入力の 70 MHz 第 1 中間周波が作れ、ATS-1 号のトランスポンダー No. 2 に近い周波数ということで 4180~4182 MHz の実験周波数を決めた。ローカル系に使う周波数シンセサイザーは HP 5100 B と HP 5105 A を用いた。どちらもシンセサイザ内でループを組まず、直接通倍分周を行なう直接方式のもので、この方が位相安定の見地からはよい。出来れば

同じものを 2 台用意すべきのだが、悲しいかな、限られた予算の中で行なう今回の実験では贅沢は言っておれず、電波研内を見まわして使えそうなものを周波数標準部でチェックして頂く、という結果になった。(こういうのを英語で Hobson's choice というのであるらうか。) 上述のシンセサイザ出力は上限周波数が 50 MHz と 500 MHz と異っており、第 1 ローカル周波数 4110 MHz を作るのに 41.1 MHz x 100 通倍と 411 MHz x 10 通倍といった具合に通倍数を違えた。この点位相安定度について危ぶむ向きもあったが、終ってみて予想以上に安定だったのは幸いであった。

(2) 記録信号発生部

IF コンバータから出てくる信号を VTR に記録出来るからと言ってやみくもに記録するわけにはいかない。あとで 2 つの VTR を一ヶ所に集めて相関をとる場合に困るからである。そこで後からの相関操作を容易にするため、VTR 上のビデオ帯のビット配列を細かく規定し、オーディオ帯には時刻ビットを配列する。そしてオーディオ、ビデオ両者共に、1 ビットの長さは異なるが(オーディオ帯は 0.5 m sec/bit、ビデオ帯は 250 n sec/bit)、フレーム No. とシンクワードが入っており、一定のビット配列がくると(例えばビデオ帯では 011 のくりかえしを 18 回)フレームの初め、というふうに識別する。

その他この場所で digital diphase coding (複位相変調)と呼ばれる一種の FM 変調を行っている。これにより磁気テープ走行に Wow や Flutter と呼ばれる一様走行からのずれがあっても再生時に 4 MHz のタイミングを“自分で”作り出し、そのずれを補償することが出来る。

(3) VTR VR 489 DR

ローカル系に対し VLBI システムのもう一つの心臓ともいえるものがデータ記録用の VTR である。今回は VTR に充分資力をつぎこむことが出来ず、システムの構成時期と後の処理段階で大いに問題となった。

この VTR を選んだ理由は、① 価格が手頃である、②

記録時間が比較的長い(90分), ③構造が Mark II で使われている VR 660 C に似ている(ヘッドが二つ), ④大きさも2人で持運び可能(外形寸法 550W×460D×272H, 30 kg), などからであった。

今回のシステムの問題の一つは, VTR のメーカーとその前後の記録信号発生部, 再生関連部のメーカーとが異なる点である。再生関連部は, その製作途中で, VTR という微妙な装置を対象とするのにふさわしくなく, いささか変更を余儀なくされた部分もあった。さもなければ, VTR に記録したデータが再生関連部のメモリーにとり込めなかったからである。

また前述の digital diphas coding によって 4 MHz 及び 8 MHz の矩形波が VTR に記録されるが, この再生の際両者の duration が正確に 2対1とならず, そのため digital diphas coding から再生した 4 MHz のタイミングに不要なインパルスが生じ, やはり VTR テープ上のデータを再生関連部のメモリーにとり込むのに困難な場合があった。

この外, VTR テープ上の記録がよくても, 再生時の“ドロップアウト”といて, テープに記録したデータがそのまま再生関連部のメモリーに移送されず, 一部のデータがぬけてしまい, 後のデータが前の方にずれて移送され, データの時間がつながらないという現象が起きた。これは電波星のように弱くて比較的長い積分時間(といっても1秒程度)を必要とする場合, 問題となる。

今回の実験では, 通常の VR 489 用のテープではなく高密度テープ V-72 を用いた。

(4) 再生関連部及びデータ処理

VTR の出力信号は, バンド幅制限のため入力時のパルス波形がなまり, 正弦波的になるが, これを再び波形整形して矩形波とし diphas code に戻した(ビデオ波形整形回路)後, diphas decoding を行って NRZ 信号にする(ダイフェーズ復調回路)。その後両地上局で得られた VTR の信号間の相関を, 予め得られている知識を基に, どちらか一方の局の遅延時間に相当する分だけビットシフトさせ, Exclusive NOR なる論理演算によって行なう。実際には相関値の平均を零にもってくる操作を行って相互相関関数 $R(\tau)$ を求める。この $R(\tau)$ をフーリエ変換し, 0~2 MHz のバンド内周波数に対するクロスフェーズスペクトルを求めることは1で触れた通りである。

(5) 時計合わせ

VLBI 実験では, 基本的には, 両局の時計の絶対時刻よりも, 時刻の差の絶対値の精度が問題となる。今回の実験では, 実験の前後に鹿島で両方の Cs 原子標準を 10 n sec 以下の精度で合わせ, 実験期間中は東京タワーからの 10 チャンネルの電波を受け, その水平同期パルス

の 10 番目を Cs 原子標準の秒パルスと比較する方法で行った。この TV 電波による時刻比較精度はプラスマイナス 100 n sec 以下であった。

(6) 局内ディレイタイム測定

実験システムとは直接関係ないが, 二アンテナを結ぶ基線の測地的意味は, 一般に各アンテナの直交軸の交点を結ぶ距離である。これを求めるには, 仰角・方位角軸の交点からデータをサンプリングする点までの信号伝達時間を除かねばならない。この時間を一般に局内ディレイタイムといている。実測と理論値を含んだ測定値は, 鹿島側では 729 n sec, 横須賀側で 364 n sec であった。これらは仰角・方位角軸直交点よりコンパター入力までの値で, 測定精度はプラスマイナス 20 n sec 位であった。

3. 実験内容

一日一日薄氷を踏む思いで, シュミレーションを繰り返し, 新たな問題に対処し, アンクルエンコーダを修理し……, といっているうちにまたたく間に実験の日が近づいてきた。今回の実験は後に続く一連の衛星実験計画の日程に支障をきたさないように, とのことで最初の静止衛星である ETS-II (技術試験衛星 II 型) の打上げ予定(昭和52年2月11日)前に実験を終了させる必要があった。

(1) 実験日程

実験期間は横須賀到着, セッティングから実験終了後の撤収まで含めて10日間, はじめの2~3日のうちにセッティング, 横須賀側アンテナのポインティングチェック, 局内ディレイ測定, そしてインテルサットIV号衛星を使つての最初の試み, と目まぐるしかった。特に一連の実験を続ける前に予めインテルサットIV号を使つて相関がとれることを確認しておこうという方針であったので, そのためには横須賀で使つた VTR をテープと共に鹿島へ搬入し, 相関操作を行う必要があった。というのは VTR VR 489 DR の性能のぎりぎりのところを使っているためか我々の目的に関してはテープの互換性がほとんどなかったからである。結果的にはやる必要がなかったのであるが, 一回目は有意な相関が現われず, やきもきさせた。

(2) 電波源について

VLBI 用の電波源としては実験目的によって静止衛星の衛星ノイズ又は電波星が使用される。前者は衛星の軌道決定に, 後者は準星の分解等の天体物理的応用は勿論であるが, 測地的応用, U.T. 1 の変化, 極運動の研究, などの目的に使用される。どちらの場合もランダムノイズを電波源とする理由は, 理論的によく解明されており, 相関の時間的ピークの決定精度が受信する全体の帯域幅に逆比例してよく決まり, 一個のパルスでタイミングを

決定するよりも精度がよいからである。衛星ノイズとしては ATS-1 号（応用技術衛星）及びインテルサット IV 号（F-8）を用いた。

イ) ATS-1 号

ATS-1 号は打上げ後 10 年以上経過してもなお“現役”という非常に稀な衛星である。今回の実験に当たり、衛星ノイズのレベルが高くなるように米国ロスマン局からのコマンドを依頼したが、担当者は快く引受けて下さり、2月1日～2日、及び3日～4日の24時間、3時間毎に9回ずつ、1回15分間コマンドをかけてもらった。コマンド内容はトランスポンダ No. 2 (4178 MHz) を FT (Frequency Translation) モードで、TWT 2本を ON とするものであった。ノイズレベルは高く電波天文の単位で 10^4 f.u. ($1 \text{ f.u.} = 10^{-20} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$) 位 (-95 dBm 程度) であった。ただこの衛星は仰角が低く鹿島、横須賀共 $1.6 \sim 11.5^\circ$ の間変化した。

ロ) インテルサット 4号系 (F-8) 衛星

この衛星は御承知のように KDD が商用として国際通信に使っているものである。今回の実験では、丁度我々の受信周波数は予備の TV チャンネル用に該当し、余程の国際的大事件でなければ使わないだろうとのことであった。平生は TWT ON の状態で使っているので、コマンドをかけなくても充分電波強度が強く、ほぼかに星雲並みの強さ (600 f.u. 位) であった。この衛星は1日の変化範囲が仰角方位角共 0.2° 以内とほぼ静止しているので追尾は容易であった。

ハ) 電波星

全天に既に一万個以上発見されている電波星の中で、VLBI 用の基準電波源として使えるものはそれ程多くない。その理由は、見かけがビーム幅 λ/D rad より小さく、出来るだけ強い電波源との観点から銀河系外電波源のうち準星やラジオ銀河の一部に限られるからである。今回はこれらの中で最も観測し易いと思われるもの三つ、即ち 3C 84 (ラジオ銀河)、3C 273B (準星)、3C 454.3 (準星) を選んだ。これらの電波強度は、全体として $15 \sim 40 \text{ f.u.}$ あるが実際に“相関する”エネルギーの割合は中心部の $7 \sim 8$ 割程度 (場合によっては半分以下) である。

インテルサット IV 号・電波星共記録は 30 分乃至 1 時間毎に 3 分 ON 2 分 OFF を行ない、ATS-1 号は 10 分 ON 2 分 OFF であった。電波星の場合はこの他フリンジ (相関関数の位相の変化による強度の山や谷) の起る時間的割合が 0 に近いところも記録した。これはフリンジを止め位相をそろえて積分する操作が容易なためである。

ニ) 実際の操作

実験スケジュール通り 30 分乃至 1 時間毎に、① 受信直前鹿島と横須賀の時計合せ (記録信号発生部の時刻表

示の秒を電話で合せた)、② 各機器のチェックをし、双方 ready の状態を確認して受信記録スタート、③ ON、OFF 記録経過後 ④ システム雑音温度測定 (相関の割合 coherence に影響する)、ローカル周波数安定度チェック、等を行った。

ある程度軌道にのってくると、当初程神経を使わなくてもよく、どちらかと言えば All or Nothing といった感のある実験となった。実験の初めと終りに周波数標準部の方々に鹿島と横須賀に来てもらい、Cs 原子標準のチェックや TV を使った時刻同期を担当してもらった。本番中は第二宇宙通信研究室の 6 名が両方にわかれて実験を行った。

4. データ処理とその結果

データ処理について詳しく述べるスペースもないので、ここでは最初にデータ処理を行ない、実験成功を確かめたインテルサット IV 号の場合について説明する。

データ処理については 2 の (4) で少し触れたが、2 の (3) で述べたような再生時の“ドロップアウト”現象があるので、処理の最初にとりこんだデータの自己相関をとり、確実に時間がつながっていることを確認した。また磁気テープ上のデータの移送については今回の再生相関部の処理能力が大きくなり、通常の play 中のスピードで 1 フレーム (1/60 秒分) 毎に移送しては、数秒間 reverse する方法をとらざるを得なかった。

最初の処理結果は 1 月 29 日 21 時 37 分 (J.S.T.) インテルサット IV 号を両局で受信したケースである。受信後早速 2 回目の深夜の鹿島への VTR 運搬作戦となったが、鹿島到着は 30 日午前 1 時 30 分、河野、高橋両君による最初の処理結果が出たのが午前 5 時過ぎといった次第であった。後で聞いた話であるが、2 回目の処理の時も初めビットシフトの方向を間違えて (鹿島の方を時間的に遅らすべきところを、横須賀側を遅らせた) 今日もだめか、とふてくされて (?) ソファの上ひっくりかえったそうである。

この最初の結果は図 2 に示してあるが、予めインテルサット IV 号系衛星の予測位置から鹿島と横須賀への電波の到達距離差約 11.5 Km に相当する 158 ビット分シフトさせて相互相関をとる。実際は約 5 ビットずれた 153 ビットシフトに相当する付近に求める遅延時間があることがわかる。

さらに精確な遅延時間は図 3 の勾配から決定される (1. 参照) が、この図では $\pm 10 \text{ n sec}$ 程度の誤差で求められ、これは光路差 $\pm 3 \text{ m}$ に相当する。また同じ図 3 の 0 MHz (実際には 4180 MHz に対応) での相対位相決定精度は、波長 7.2 cm を 360 度として 6 度位であり、これは相対光路差 1.2 mm に相当する。これを衛星軌道上での相対運動に換算すると、大体 $2R/D$ (R : 衛

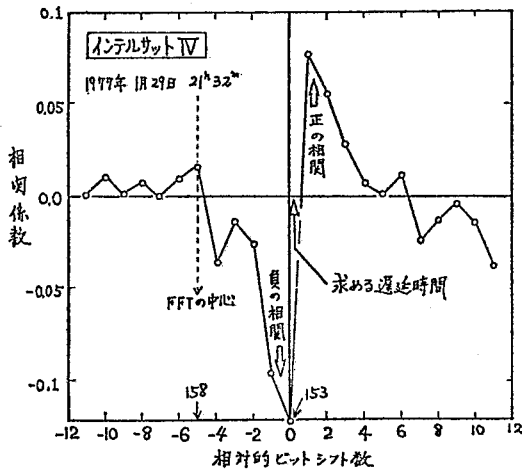


図2 相互相関処理の一例

星までの距離、 D ：基線間距離)に比例するので、80 cmの動きに対応することになる。

以上はインテルサットの場合であるが、ATS-1号の場合も同様の結果が得られている。ATS-1号の強度はインテルサットの10倍程度なので、積分時間はわずか100ワード=0.45 msecでも一応の結果が得られた。

先の図3では遅延時間決定精度を10 n sec位と書いたが、かなり厳密な補正を施すと現システムでも ± 5 n sec程度までおさえることが出来る。これは光路差1.5 mに相当する。

これらの精密遅延時間データを使って静止衛星の軌道決定の試みを行っており、衛星の追尾に十分な精度で軌道を決定出来る見通しが得られた。

5. 二、三の応用について

最後に近い将来の応用等につき二、三触れてみたい。

VLBI技術を利用した測距は何といっても一万Km以上も遠く離れた2アンテナ間の距離を一挙に計ってしまう(地中を貫いた直線として)という利点は他の追従を許さない。(尤も基線間の距離が長くなると、時刻合せの困難さや対流圏、電離層の影響の違い、フリッジレットが距離に比例して大きくなりその影響を除く困難さ、など観測条件が異なるためそれだけ誤差も入りやすくなる。)この点基線が長くなるとそれだけ相対的測距精度が上ることになる。逆に地上レーザー測距が可能な位の比較的近距离では他の方法と同程度であろう。

極運動研究者の話では、従来の恒星観測による極運動研究は観測所相互間の位置関係が一定不変のものとしてデータ解析を行ってきたが、最近ではこの前提が怪しくなり、新たな技術革新を迫られている。現在、衛星ドブラー、月レーザーそしてVLBIが考えられているが一番最後に生き残るのはVLBIだろうと言われている。衛星の軌道決定は従来 R/RR 法という地上から電波を

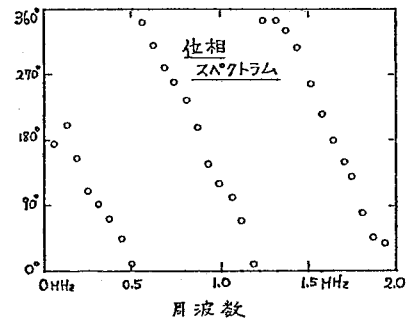


図3 インテルサットIV号電波の位相スペクトラム

送信する能動的方法で行われてきているが、VLBI技術を使えば受信だけでよくなる。ただデータ処理時間に難点があるが将来衛星経由または地上マイクロリンクでデータをon line的に送れるようになれば、時を経ないで軌道データを算出することも可能となる。

またVLBI技術を使って衛星電波の相対的位相を測定することも出来る。この位相変動の要因は、衛星の動きの他、両局のローカル周波数の不一致、伝搬媒質によるゆらぎ、などが考えられるが、伝搬媒質によるゆらぎは位相シンチレーション測定としてECS(実験用静止通信衛星、昭和54年2月打上げ予定)計画にも考慮されており電波伝搬上貴重なデータを提供することになる。

ここ当分はそれぞれの目的或いはコストパフォーマンスに従って多様なVLBIシステムが並行して用いられる時代を迎えるであろう。

むすび

種々の制約の基での基礎実験であったが現在のシステムでも両アンテナ間の遅延時間決定精度は ± 5 n secまでいく見通しがついた。さらに、問題となったIFコンバータ内ゼロビートミキサーをもう少し注意して製作すればもっとよくなるはずである。これらの実績を踏まえ、更に次のステップとして以下のことが考えられる。
イ) データ収集用VTR及び再生相関部を高性能化し処理時間を短縮する。
ロ) バンド幅合成技術を習得し、遅延時間決定精度を飛躍的に向上させる。
ハ) 電波星電波の位相変化をとめて長時間積分を可能にするフリッジストップピングをマスターする。これらの技術を克服し、更に一層の発展を期したいものである。

拙文を終えるに当たり、今回の実験相手局として御協力頂いた電々公社横須賀通研の方々には深甚の謝意を表します。また時刻同期やローカル系のチェックにお世話になった電波研究所佐分利部長以下周波数標準部の方々にも厚くお礼申し上げます。今回の実験は当初からの推進者である電波研究所鹿島支所第二宇宙通信研究室尾嶋武之、河野宜之、高橋富士信の三君の御努力に負うところ大なることを付記しておきます。