

18. 超長基線干渉計実験の現状とその問題点

川 尻 轟 大*

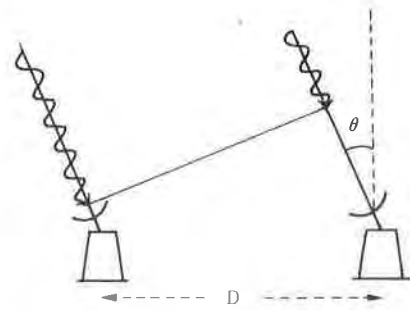
1. はじめに

6年程前筆者が滞米中に耳にしたVLBI (=超長基線干渉計) という言葉がいよいよ年と共に身近に聞かれるようになってきた。すでに2~3年前より江戸末期の“黒船到来”にも似て、アメリカの2・3のInstitutesから協力依頼の打診がなされ、また予算要求もすでになされておられ、このような解説記事を書くのはいささか遅きに失した感なくもないが、今まで集めたVLBIに関する資料を基に、出来るだけ最新の技術およびその多方面にわたる応用等を紹介しようと思う。何分技術的にかなり広範囲の知識を要する実験なので浅学なる筆者では十分意をつくさないとと思うが、不明な点は更に後につけた参考文献を参照して頂ければ幸いである。

2. VLBIの原理

VLBIの原理を述べる前に、その因って来たる電波干渉計の発達について簡単に触れよう。第二次大戦後急速に発達した電波天文用干渉計は、長い間、二つ以上のアンテナをケーブルで結んでそれらのoutputを干渉させるやり方で、今も多くの(特に太陽電波)観測所で実際に行われている。しかしこの方法では距離が長くなるとケーブルの熱膨張その他により位相の安定度を保つことが難しく高々数kmが限度である。アンテナのスパンを延ばす次の段階として一時期VHFないしマイクロ波リンクを用いる方法が試みられた。これは1951年から1952年にかけて、ジョドレルバンクのR. H. Brown, R. C. Jennison, M. K. Das Gupta⁽⁴¹⁾により周波数125MHz, 10~50kmのスパンで、シドニーではB. Y. Mills⁽⁴²⁾が101MHz, 0.29~10.01kmのスパンで、又、ケンブリッジでF. G. Smith⁽⁴³⁾により波長1.4mで最大423波長で、それぞれ0.'3~2'のビーム幅を用いて主な電波源の分解に応じた。又、マイクロ波については1965年ジョドレルバンクのH. P. Palmer等によって行われ、127kmのスパンで6cmの波長を用い、0.1秒角の分解能を得ている。しかしこれもスパンが長くなるとマイクロ波の伝搬上の問題が生じ、又、長いリンクを維持する困難さもあって、その後あまり使用されていない。

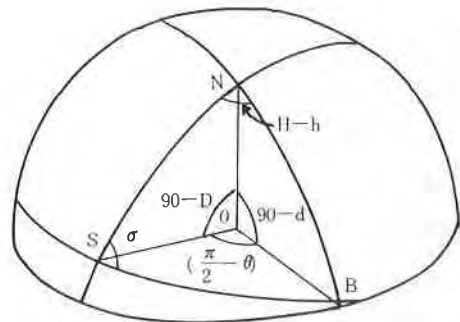
こうしてVLBIの登場となるわけであるが、その特



第 1 図

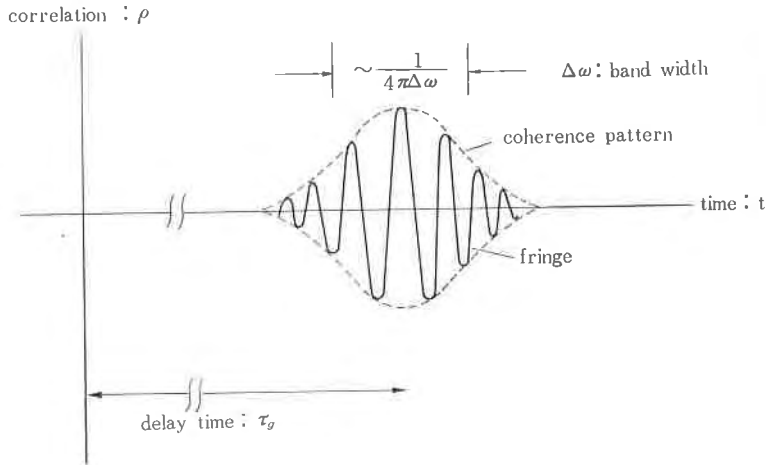
徴である、それぞれ独立した局部発振器とテープ記録による干渉計の実現の可能性はすでに1961年ソ連において考えられていたそうである⁽⁴⁴⁾。しかし当時は、安定した周波数標準や高感度でワイドバンドのテープレコーダを得るのが難しく、結局最初にこのような方式の干渉計を使ったのは1965年フロリダ大学⁽⁴⁵⁾においてであった。当時は、18MHzの周波数で木星電波を観測し、周波数安定度 10^{-9} 、時刻は0.001秒で同期しておれば充分で、電波を放射する領域が角度で0.1秒以下であることを確認した^{(46), (47)}。

前おきはこの位にして原理に移ろう。VLBIといっても干渉計としては最も基本的な2素子干渉計(第1図)である。2素子干渉計は距離D離れた二つのパラボラから成り、波長 λ (周波数 f)で電波源からの輻射を受け、それぞれのアンテナで得た信号は一方所に集められ掛け合わされる。若しこの二つの信号がコヒーレントであれば、その積は地球が回転するにつれて規則的な最大値と最小値(フリンジ)を示す。これは地球が回転する



第 2 図

* 鹿島支所 第二宇宙通信研究室



第3図 Fringe と Coherence Pattern の関係

につれて二つのパラボラに入射する波の相対的な path length が変化し、掛け合わされる信号の相対的な位相が変化する為である。この場合、もし二つの信号がインコヒーレントならフリンジは生じないし、コヒーレンスの程度により相対的なフリンジの振幅が変わってくる⁽¹³⁾。

ここでVLBI技術の難しいことの一つである相対的 path length, すなわちアンテナ1と2に入る入力信号の時間差 (Time delay : τ_g) を第2図から求めよう。第2図において基線は天球と点Bで交わるとする。点Bの時角 (hour angle) と赤緯 (declination) を (h, d) とし、電波源Sの時角と赤緯を (H, D) とおく。なお、Nは北極である。ここで球面三角 \overline{NSB} にその Cosine 則を適用すると

$$\sin \theta = \sin d \sin D + \cos d \cos D \cos(H-h) \quad \dots(1)$$

となる。この(1)式を使うと二つのパラボラまでの到着時間のずれ τ_g は次のように表される。

$$\tau_g = (D/C) \sin \theta = \frac{D}{C} (\sin d \sin D - \cos d \cos D \cos(H-h)) \quad \dots(2)$$

ここで C は光速である。フリンジ周波数 F, すなわち毎秒幾つのフリンジが現れるかは

$$F = \frac{d(f\tau_g)}{dt} = -\frac{dH}{dt} \frac{Df}{C} \cos d \cos D \sin(H-h) \quad \dots(3)$$

で表される。

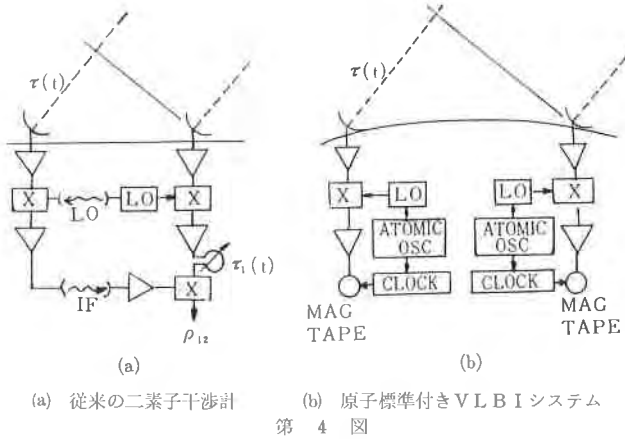
こうして τ_g だけずれた二つの信号からフリンジを導くまでを、後に示す第4図のようなVLBIシステムの一例を用いて簡単に説明しよう。それぞれの地上局では、まず通常の電波天文観測のように、低雑音の前増

幅器で増幅し、一方原子標準に準拠した信号を安定なシンセサイザと組合せ、通倍して第1局部発振周波数とし、ダウンコンバータに入れて第1中間周波数 (100MHz 前後) をつくる。これをさらにテープレコーダに入れられるようなビデオ周波数帯 (数 MHz) におとし、クリップし、高速符号化して one-bit の on-off 信号とする。これを Ampex VR-660C のようなVTRに記録し、後両地上局のVTRを1カ所に集め、one-bit 同志の掛算すなわち相関をとって第3図のようなフリンジを得る。その際一方のデータをあらかじめ得ている知識を基に μsec 位の精度で time lag 分 τ_g だけずらして行う。この相関のピークが結局同じ電波源から放射された電波の波面を示すことになり、これを基に両地上局で得られた二信号間の超精密な time lag を得て、基線間の距離や電波源の方向等の情報を得ることが出来る。得られるフリンジの幅は通常の二素子干渉計と同じく λ/D rad 程度であり、これはバンド幅によってきまる coherence pattern の $1/10 \sim 1/100$ 程度である (第3図参照)。

以下に個々の技術上の問題について幾分過去にさかのぼりつつ現況を述べたいと思う。

3. 給電系と受信機系

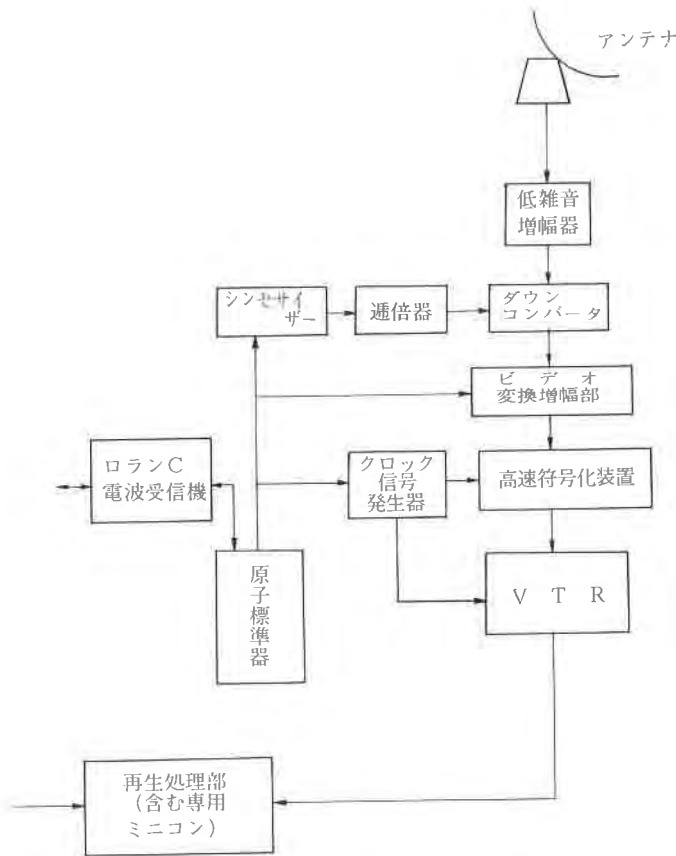
第3図に従来の干渉計とVLBIシステムの大まかな違いが描いてあるが、更にVLBIの代表例として第4図に典型的なVLBIシステムのブロック図を紹介しておこう。VLBIシステムとしてはアンテナ、給電系部、受信機系部 (Independent Local としての高安定な周波数および時間標準を含む) そして記録とデータ処理部に大別される。本章ではそれらのうち特に給電系部と受信機系部に焦点を当てつつ、現状を検討報告する。



るアメリカの地上局は最近 S バンド (2290 MHz 附近) 及び X バンド (7850MHz 附近) に統一されつつあるとのことである。ロスマンやモハービ等の ATS 局でさえそうだとすることで、アメリカの地上局を相手にする時はまず第一にこの問題を解決しなければならない。より一層の精度を上げるために S/X 両バンドの同時使用がアメリカで行われるとのことだが、幸い鹿島支所の 26m アンテナは 15GHz 程度までそんなに損失が多くなく使える (面精度 1mm R. M. S.) のでその気になれば S/X バンドの取りつけも困難ではなからう。

因みに今まで実行された VLBI 実験での使用周波数は上記二つの他、長波長側では 18, 34MHz⁽³⁵⁾, ⁽³⁶⁾, ⁽³⁷⁾ (どちらも木星電波用) や最近 NRAO, NOAA, NRL, AIO 等の間で行われた 26.3, 73.8, 111.5, 114.5, 144.5, 196.5⁽³⁴⁾, そして 400, 610MHz など、1 GHz 以上では 1.4, 1.6, 2.7, 4.178, 4.995, 8 GHz があり、米ソが協力して 1969 年, 1970 年に行った実験では 8.55GHz ($\lambda = 3.5\text{cm}$) と 22GHz⁽⁴⁾ (水の線スペクトル周波数附近) を用いている。どちらかといえば電波天文用として保護されている周波数が多いのは、その歴史的経過からみて当然であろう。

VLBI 用周波数について最近の別の動きに IUCAF (=電波天文学および宇宙空間科学に対する周波数割当ての連合委員会) における提案がある⁽⁴⁵⁾。これは 1973 年西ドイツ・コンスタンツにおける会議でハンガリー代表から提案があったもので、VLBI の測地的応用のために 10.68~10.70GHz を専用周波数に決めてはどうか、ということであった。この周波数は現在電波天文用に割当てられており、波長も適当に短く、測地精度向上にはかなりよい周波数と思われるが、ただ、日本を含む 14 カ国において Footnote 405 B で他の固定又は、移動局業務にも割当てられて



a) 使用周波数と給電系

まず使用周波数であるが、現在鹿島支所で VLBI 用として使える周波数は ATS-1 号用として宇宙通信に用いている 4178MHz のみである。ATS 用あるいは 4178 MHz を用いている地上局を相手にするのならそれでもよいのであるが、最も VLBI の相手局として可能性のあ

いる点がちょっと気にかかる。

b) アンテナ, 前置増幅器, 電波源と S/N 比

一般に S/N 比を良くして良いフリンジを得るためには イ) 大口径アンテナ, ロ) 低雑音前置増幅器, そして ハ) 強い電波源が望ましい。イ) については、強い天体電波源を用いた場合でも直径 20m 程度は欲しいとこ

第1表 V L B I 用電波星の例

名 称	位 置		強 度 単 位 $10^{-26} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$					
	$\alpha(1950)$	$\delta(1950)$	10GHz	5GHz	2.7GHz	1.6GHz	1.4GHz	0.4GHz
CTA--21	^{h m s} 03.16.09.1	16°17'40"	1.33	2.86		7.0		9.5
3C--84	03 16 30.0	41 19 52		19.7				29
3C--120	04 30 31.6	05 14 60		9.0		4.0		5.8
4C--39--25	09 23 55.3	39 15 24		7.2				
PKS1127--14	11 27 35.7	-14 32 55		7.1	6.5	6.2	6.2	5.0
3C--273	12 26 33.3	02 19 42		31	37.3	31.0	41.2	55.1
3C--279	12 53 35.8	-05 31 08		15.4		11.0	6.3	15
3C--345	16 41 17.6	39 54 11		6.5		6.5	6.7	8.6
CTA--102	22 30 07.8	11 28 23	2.60	3.65	5.3	6.4	6.7	7.1
3C--454.3	22 51 29.5	15 52 54	17	17.20 (21)	10	12	14.0	13.2
3C--48	01 34 49.8	32 54 21	2.56	5.37				37
3C--286	13 28 50.0	30 45 58	4.64	7.48			16.2	23.0

ろである。もっとも静止衛星の satellite noise (-90 dBm 程度で 10⁴f. u. 相当, バンド幅20乃至30MHz)を用いれば数m級のアンテナで充分であろう。ただその場合衛星の動きが問題になるが, ロ)については, 一般に前置増幅器の雑音温度が受信機システム温度をほとんど決定してしまうが, 良いフリンジを得るための Figure of Merit にはアンテナの有効面積と系全体のシステム温度の低さとは同等に貢献する。⁽³⁾ 鹿島支所26mアンテナは常温パラメトリック増幅器(雑音温度 70°K)を使いシステム温度120°K程度であるが, 出来ればもう少し下げたいところである。NASAの Goldstone やスウェーデンの Onsala ではメーザーアンプを用いて他の局よりその分だけ進んでいる。ハ)の電波源については一般に視直径が小さく構造が単純で比較的強度の大きい準星が用いられている。又, 基線間の距離が長くなると分解能 (~λ/D) も上るので用いる電波源も小さい角度のものを対象にする必要がある。参考までに V L B I に適した天体電波源の例を第1表に載せておく。

c) Independent Local Oscillator

V L B I の最大の特徴である Independent Local Oscillator (以下 I L O と略) について言及しよう。元来とり扱う電波源からの電波はほとんどランダムなノイズであり, 専ら二つのアンテナで到来電波のパワーの相関をとること, すなわち coherency が問題になる。その際二つの I L O 同志にはわずかの周波数差があるが, これは単に地球の回転による自然のフリンジレートに追加されるだけである。問題は, それぞれの I L O につきまとう位相の fluctuation で通常, 時間にして1分内外

である可干渉的積分時間 (=コヒーレンスタイム) 内で平均して少なくとも 1 rad 以下でなければならない。これは現用の原子周波数標準用発振器に対する要請でもある。以下に現用の原子標準について若干記述しよう。

水素メーザー発振器は最も良い正弦波形を生ずるが, 北米内の大きな観測所 (Goldstone, Algonquin Park, Haystack, Green Bank) 等ではこのメーザーを使い成功している。Sバンドの λ=13cm 使用の場合, このようにして可干渉的積分時間が S/N比を損うことなく30分にも達している。⁽³⁾

R₀ 発振器もマイクロ波帯で I L O 信号用に使用されている。このコヒーレンス・タイムは λ=3cm で 20sec, 6cm で数分間位である。性能のよい水晶発振器は, 短期安定度が R₀ より優れているが, 長期間では割に早くドリフトしてしまう。しかしこの長期不安定性は1分間程度の時定数で高性能の水晶発振器を R₀ にフェーズ・ロックすることにより解決される。これによって λ=3cm で1分間程度のコヒーレンスタイムが得られる。この組合せの優秀さは, すでに NRAO (=米国国立電波天文台) と OVRO (=Owens Valley Radio Observatory) の間の V L B I 実験で証明済みである。NRAO側にはメーザーがあり, OVRO側にはHP5065A R₀ 発振器があって Sulzer 2.5C 水晶発振器をドライブしたり, あるいは単独で用いられているが, R₀+水晶発振器のコンビは R₀ 単独より遥かによいとのことである。⁽³⁾

C_s 発振器も時間や周波数の標準に用いられている。以前は R₀ 発振器よりは伝統的にノイズが多いとのことであったが, 最近はかなり改善されてきており特に high performance tube を用いた場合, 長期安定度は元より

短期安定度についても $\Delta f/f \sim 5 \times 10^{-12}$ (1分間) と R_b をしのぐ程よくなっている。

4. 記録方式とデータ処理

第2節の初めにV L B Iの登場するに到った経緯を述べたが、比較的初期の段階で、カナダとアメリカでそれぞれ別々に記録方式を開発していた。⁽¹¹⁾そして今もその二つの流れは形を変えながらも続いている。

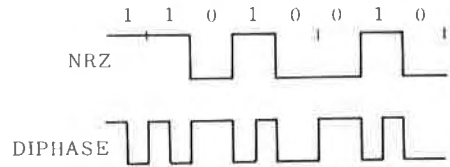
イ) 二つの記録方式⁽¹²⁾

i) カナダの国立研究会議 (=National Research Council) とトロント大学が協力して行った方法は、テレビ用の標準VTRの電気回路に若干の改造を施して、タイミングとIF ($f_{IF} = 2 \sim 3 \text{MHz}$, バンド幅=4MHz以内) 出力をアナログ量のままMTに記録させるものである。この方法の長所は、a) 比較的広いバンド幅がとれ、S/Nの向上をもたらす。b) 記録密度が濃く比較的長時間記録出来る(30分~60分)。しかし短所としては、再生の際テープを同期させるのに特別な装置が必要で、タイム同期にやや難がある。この点は、片方のVTRの送りのスピードを変えて相関するところを見つけ、いったん見つかればあとは同じスピードに合わせる、といった方法で解決している。

ii) これに対しアメリカの国立電波天文台(NRAO)とコーネル大が協力した方法は、one-bit digital samplingをやった後digital recordingを行うもので、中間周波数数百kHz、バンド幅数百kHzであった。この方法の長所は、a) Digital computerで処理しやすい。b) bit to bitで相関をとるのでタイミングが比較的正確である、という点である。短所はa) サンプリングの為に若干S/N比が低下する(one bit correlatorの場合 $2/\pi = 63.66\%$ に低下)。b) MTの記録速度でバンド幅が制限される($\sim 500 \text{kHz}$)。c) 1巻のテープでの記録時間が数分と短い。d) 電子計算機処理に長時間かかる。IMB360-50で当初1日分の観測データの処理に約90分かかったが、今はもっと早くなっている。

ロ) NRAO MARK IIシステム⁽¹⁷⁾

その後NRAOのB. G. Clark達によって両者の長所を生かす方法が考案され、現在Mark IIシステムとして発展してきている。この特徴は、記録方式と再生方式にあり、イ) すでにMark Iで使われているようにIF電圧を直接記録せず、clipしてone bitにデジタルサイズしてからrecordingするが、その際タイミング信号を非常に多く丁寧に入れている。ロ) Recording



第6図
上: 典型的 Non-Return-to-zero フォーマット
下: 同じデータの digital diphase coding.

saturation effect や head impedance effect を避けるため、digital diphase coding を行う。ハ) 割に簡便なVTR Ampex VR660Cを用いてしかも感度を上げた。ニ) 再生時にハード的工夫を施してデータ処理速度が非常に早くなった。ここでいうdigital diphase coding(第5図参照)について少し言及すると、VTRはヘッドが回転しているので、高速録音が可能であるが、残留磁気や飽和性、磁化領域同志の干渉の問題があるので、高速デジタル記録は不得手である。そこでdigital diphase codingでは各ビットの始めでtransitionを起こし(0 \leftrightarrow 1の変化)、さらに1のビットの時には中間でもtransitionを起こさせている。これは一種のFM変調であり、こうすれば高速recordingが可能になる。

こうしてMITグループとNRAOのB. G. Clarkらによって開発された、前段階のMark Iシステムを改良し、Mark IIシステムでは、バンド幅を広く、timingを正確に、そしてデータ処理が早くなった。

ハ) バンド幅合成

しかし何ととっても角度や距離分解能に飛躍的進歩をもたらしたのはMITのシャビーロー派の開発したbandwidth synthesisによる処理方法であろう。一般にphase delayすなわち波面の到達時間の分解能は有効なバンド幅に逆比例するが、100MHz又は、それ以上のバンド幅は通信電波の存在のため実現困難であるし、又、MTの記録能力の点でも不可能といえる(もっとも最近の情報によるとアメリカでは400M bit/secというRecorderが開発されたとのことだが)。そこで比較的狭いバンド幅の数周波(あるいはそれ以上のチャンネル)の信号をシンセサイザーによりサイクリックに選択して適当な周波数間隔で配置されたチャンネル毎に記録した後、それらを合成して、等価的に、広いバンド幅と同じ効果を作るのである。このbandwidth synthesisについての理論的基礎とチャンネル選択の決定例をE. E. RogersがRadio Scienceの中でうまく説明している。⁽¹⁴⁾

この技術はすでにあちこちの実験で採用されている。

上述のMITのMark I システムは、それぞれのチャンネルは数百kHzとそんなに広くない。後述するJPLのMac-DoranらはARIES計画(Astronomical Radio Interferometric Earth Surveying)に、バンド幅4MHzを中心周波数40MHzで離し、2チャンネルではあるが、ambiguityについてはあまり心配なく実質40MHzのバンド幅で得られるような時間分解能を得ている。⁽³⁰⁾ 又、NRAOで開発中のMark III システムでは2MHz幅で28チャンネル、合計56MHzのバンド幅で行うとのことである。この技術は今後測地学的精密距離測定等には不可欠の技術となるであろう。

二) 時計比較

本章の終りになったが時計比較のことに触れよう。一般に基線の両端で使用する時計は(初期の長波長VLBIは例外として)少くとも μsec のオーダーで一致していなくてはならない。というのは、データ処理の際、すでに得ている知識をもとに、相関をとる操作を開始するのにあらかじめ μsec 程度の範囲まで追いこんでおく必要があるからである。この両方の時計の時刻を比較する方法として次の幾つかの方法が実行され、ないしは考えられている。

a) ロランC電波の利用⁽¹⁹⁾

航法用電波ロランCは世界中で八つのチェーンを持っており、北西太平洋地域ではマスターステーションとして硫黄島から発射されている。この周波数100kHzのロランC電波は、立上り時間が極めて短いパルスで $0.1\mu\text{sec}$ 程度の安定度を保ち(地表波の海上伝搬、陸上ではその2~3倍)、しかもUTCに準拠しているので、これを基線両端の地上局で受信することにより、このロランC電波を仲介にして両地上局の時刻差がわかる。

b) TV信号の利用⁽²⁴⁾

TV信号を利用する時計比較は他の方法に比べて、広帯域且つ極めて安定な伝送系により国内全域で可能であり、安価な受信機でしかも短時間で高精度の比較が出来るなど、一般向きである。

すでに1970年より1971年にかけて当所の周波数標準部においてこの種の実験を行っており、(i) 同一送信アンテナからのTV信号が直接受信できる2地点におかれた時計比較の場合、送信アンテナから放送されたある特定の同期パルスを、両地点のそれぞれの時間の秒パルスを基準として同時測定することにより、時計間の時刻差の精度 $0.2\mu\text{sec}$ を得ている。ただし、受信地点の地理座標を角度にして1秒の精度で決定し、同型の受信機を使用

した場合である。(ii) 次に片方が遠隔地にあるような場合は中継回線を経由したTV信号を利用することになるが、約1400km中継された同期信号を遠距離2地点の原子時計間で測定した結果、長期にわたっても $\pm 2\mu\text{sec}$ の精度で時計比較が可能とのことである。

c) 原子時計運搬法(Flying clock 法)

これは特定の原子時計(=Flying clock)を比較しようとする地上局へ持っていき、そのflying clockとそれぞれの地上局の時刻との差から二つの地上局の時刻差がわかるという仕組みである。このflying clock方式の実例は、現在アメリカの海軍天文台が4カ月に一度、硫黄島のロランC局、モニターステーションである府中(現在は相模原)及び当電波研周波数標準部等の原子標準と、持参のCsとを比較しており、fractional deviationとして 2×10^{-13} (24時間比較で)、時刻としてはround tripの結果で $0.1 \sim 0.2\mu\text{sec}$ の精度で比較を行っている。

その他、数年前にやはりアメリカの海軍天文台(=USNO)が飛行機で東回り及び西回りで原子時計を持ち歩き、元の地点に戻った時に差が出るかどうか、すなわち地球自転の相対論的効果が現れるかどうかの調査を行った。

d) 衛星仲介の時刻同期

第5節のVLBIの応用例でも触れるが、人工衛星を電波源として使った場合、両地上局の時刻差を知る時刻同期実験が可能である。NASAでは1971年のMay 10—June 10に行われたロスマン—モハービ間のATS—3号を使ったVLBI実験中、clock offset 決定のため時刻同期実験を行った。⁽²¹⁾ 4178MHzのCバンドでパルス幅 $10\mu\text{sec}$ のシャープな立上りのパルスを、二地点間の相互に衛星のdual transponderを通して送り合うことにより、clock-offsetの平均値の差の確率誤差が 10nsec の精度で決まった。

静止衛星ではないが、1965年2月にリレーII号衛星を使って鹿島—モハービ間で行われた実験では確率誤差 $0.1\mu\text{sec}$ のオーダーであった。

5. VLBIの応用例

VLBI(あるいはJ.P.L.のようにARIESという名前もあるが)の応用は年と共に広がってきている。以下に、すでに行われたこと、現在実行中のこと、あるいはこれから実行を持つ計画について筆者の知り得た範囲内で記述してみよう。

i) 天体物理学への応用

今更述べるまでもないことであるが、VLBIは、まず電波天文学者のさし迫った要求であった高分解能のビームを作ること、特にそのビームを用いて、みかけは小さいながら異常にエネルギー放射の大きい準星の正体をあばくことに多用された。もっとも最初はフロリダ大学で木星の電波源の探索用に使われたのであるが。

こうして、1967年頃から2~3年間は、VLBIといえば大部分が電波天文的応用と相場が決っていた。これまででなされたことは枚挙にいとまがないが、特に3C273等の準星の分解、OH(水酸基)線源⁽⁹⁸⁾やH₂O線源⁽⁹⁹⁾など従来の方法では電波源の分解あるいは位置決定が出来なかったものに適用出来るようになった。これらの電波星のサイズの決定は、第3図で示したfringeよりも電波星の大きさが大きいと干渉パターンが出なくなる性質を利用している。現在では逆に、これらみかけの大きさの小さい電波源を使って、VLBIシステムに付随する種々のあいまいな定数を決定するのに役立っている。

ii) 測地的応用

これも御承知のように、最近是最も普通のVLBIの応用と考えられる、両アンテナ間の距離の精密測定で、4の(4)で述べたバンド幅合成の技術が可能になってから非常に有視観されるに至った。測量技術は、古くは古代エジプト・ギリシャ時代から時代と共に発達してきたが、最近の情勢は、比較的近距离では、三角測量、航空写真測量等が用いられ、やや遠距離になると2地点間をレーザーで結んだり、人工衛星を媒介にして、その写真をとりバックの星視野の映り方からその点の位置を決めたり、レーザー光線をあててその反射時間から地上の位置を知ることを行っている。これにVLBI技術が加われば、よき競争相手になり、また相補的データを提供することにもなる。

近年 Plate Tectonics (=構造地質学)の方で地球表面のマントル流によって大陸の移動が起こり、それが地震の原因になるという学説が有力である。第4節で述べたようにJ. P. L. のマクドラン等はカリフォルニア州のサンアンドレアス断層を中心とした地震予知の研究をするためARIES計画と銘打って、カリフォルニア南部の各点を結ぶShort Base Lineでの干渉実験を行い、1回の精度10cm以下を目指し活動中である。⁽¹⁰⁰⁾可搬型(9mφ)のアンテナを、64mφ Mars stationや26mφ Echo stationの周囲に配置し、Sバンド(2290MHz)を使って行っている。⁽¹⁰¹⁾すでにカリフォルニアとアラスカとの結びつきが試みられ、近い将来日本とも是非VLBI実験をやりたいとのこと。太平洋をはさむ両

国でVLBI実験が出来れば日米間の距離の年変化もいわず10cm位の精度で測定されることであろう。

iii) 地球自転の不均一性、極運動およびUTIの季節変化

地球の自転は完全に一様ではなく、種々の周期の変動がある。今このような地球自転の不均一性をVLBI実験で検出を試みたとしよう。これは1日2回以上、複数の電波星を、時間的に超精密に観測すれば可能である。その際単に自転の不均一性だけでなく、極運動による項も当然入ってくる事になる。これらは適当な3地点以上で求めた測定値から連立方程式を解くことによって分離出来る。又、極運動に因る項が分れば地球自転を基準にしたUT₀から、その分を補正しUT₁、従ってその季節変化も導出可能となろう。

iv) 衛星の軌道決定

これについては、地球の周りを回る移動衛星は今のところ論外で、対象は静止衛星ないしは人工惑星に限られる。

すでにNASAでは1971年にRosman-Mojave(May-June), Rosman, Owens Valley (=OVRO), Agassiz (August-September)の3点観測をATS-3号について行い、その位置が70~100m、その速度が1mm/sec以下の精度で決定した。⁽¹²⁷⁾これは衛星を電波源とした時の精度で、準星を電波源とした時は、Rosman-Mojave間について赤道投影成分に対し、1回のRMSノイズ誤差2.25m、各平均値の標準偏差は14cm、又、OVRO-Agassiz間ではそれぞれ38cm、2.5cmであった。静止衛星とはいっても複雑に動く電波源が対象であり、各局からの方向も準星のように平行というわけにはいかず、従って測定誤差もある程度大きいのは止むを得ないかもしれない。しかし第3節で触れたように、一般にサテライト・ノイズは準星の100乃至10000倍も強く、バンド幅も適当に広く、小さいアンテナでも実験できるという強みがある。又現在静止衛星までの距離測定には、能動型のRange and Range Rate法が一般的であるが、VLBIによる追尾測距法は完全に受動型で特に地上からの送信波を必要としないので、完全同時精密測距が可能になる。この方法によると、衛星の数が増加するに従って地上からの送信波による相互干渉が問題になってきている現状では近い将来重要な衛星軌道決定の手段となるであろう。

同じく静止衛星を使って遥かによい結果を出した例を紹介しよう。MITのプレストン等は1969年10月にTACSAT静止衛星を3点(Tyngsboro, Mass.; Green

Bank, W. Va.; Owens Valley, Calif.) 観測して, delay time の RMS Noise 誤差 1.4 n sec ($\approx 42 \text{ cm}$), 平均値の標準偏差 0.15 n sec ($\approx 5 \text{ cm}$ 程度) 又, delay rate は $0.05 \text{ pico sec/sec}$ ($\leq 0.002 \text{ cm/sec}$ 相当) なる結果を得ている。⁽²⁸⁾ この衛星は送信電力が 1 kW もあり, 中心周波数 7257.5 MHz , バンド幅 10 MHz で, 各々が 360 kHz 幅の八つのチャンネルをサイクリックにシフトしつつサンプルして処理している。これらの精度は, 前記の準星対象の VLBI 実験よりもかえって良い。送信出力がそんなに大きくない場合でも今後の衛星位置決定に希望の持てる数字である。

なお衛星を電波源として使った場合, 4の(=)の(d)でふれたように両方の地方局の時刻差を知る時刻同期実験が同時に実行可能なので, VLBI 実験に伴う clock-offset 量を決定することが出来る。この項の初めに述べた実験では clock-offset の平均値の差の確率誤差は 10 n sec であった。

その他, VLBI の応用として, $\mu \text{ sec}$ のオーダーでスタートして, 実験後得られるフリッジから逆に $n \text{ sec}$ 程度を目指す時計比較や太陽重力場によって電波屋からの電波が曲げられる屈折角を精密に求める一般相対論的実験も考えられていることを記しておく。

6. その他の問題点

i) 対流圏の影響

VLBI による実験で最も精度の要求される測地などで最後まで問題として残るのは対流圏の影響の不確かさによるものである。一般に対流圏内の“乾いた”成分は対流圏内でよくかきまぜられているので, 地表面近くの温度や圧力を計ることによりよく決定される。それに対し“湿った”成分は充分混合せず, 地面近くの測定だけでは対流圏を通した伝搬路の積分された影響を把握することが出来ない。そこで考えられるのは水の分子線である 23 GHz の大気放射強度をモニターすることによってこの水蒸気を主とした不確かさを克服することである。Schaper 等の理論的計算によると, これによって基線の長さへの影響は 1 cm 程度に追いこめるとのことである。⁽⁴⁾

マイクロ波電波に対する大気の屈折率は $N=1+(3\sim 9)\times 10^{-4}$ 位であって, 係数 $3\sim 9$ の変化は水蒸気と温度に依存する。⁽⁴⁾ これによる行路変動は 1 m 前後と考えられる。別の推測では, 天頂方向の水蒸気による行路換算の大きさは 2 m 程度 (8 GHz で) でそのうち 40 cm 分位が時間変動している。⁽⁴⁾

ii) 電離層による影響

電離層中の屈折率 n は, 磁場の影響が小さいので無視すると,

$$n^2 = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \quad \dots\dots(4)$$

但し, f : VLBI の operating frequency, f_0 : 電離層中のプラズマ周波数 ($\propto \sqrt{\text{電子密度}}$) で表される。電離層による行路差は $C(1-n)\times \tau$, (τ : 電離層通過時間) であり, 8 GHz では天頂方向で 8 cm 程度の等価な厚みを持つ。又, (4)式からわかるように屈折率が f^2 に依存するので, 2周波以上で観測すれば, 電離層の影響をとり除くことが出来る。とにかく電離層は, VLBI にとってもはや深刻な問題ではなくなっている。^{(4), (11)}

その他, delay time 内での地球自転による path difference のずれがあるが, これも他の諸定数から決定される。

7. おわりに

以上 VLBI について現在までの調査結果を記した。記事が, 総花的皮相的になったかと思われるが, これは紙面の都合の他に筆者の不勉強のせいもあるので, 今後一層技術的諸問題について検討を加えたい。

VLBI 関係の予算については昭和50年, 51年の2カ年計画で, 基礎実験用として既設の設備を利用しつつ, データの取得とその処理に必要な最小限の施設整備を要求したいと考えている。さし当り可能な事から実行に移し, 出来るだけ早期にその実験観測システムを確立したいものである。今はただその日の早からんことを祈りつつ, 大方の御賛同, 御協力を得て着実な前進を期待したい。

この拙文をまとめるに当たり, 石田前支所長, 船川現支所長の激励のお言葉, 原田第一宇宙通信研究室長の御協力, 及び鹿島の電波天文グループの諸氏の御支援があった。ここに厚く感謝の意を表します。

又, 滞米中の尾嶋氏から色々と最新の情報を入手出来たことも付記しておきます。

参考文献

- A. イントロダクション, 一般論,
 1. 「電波星を探る大陸間電波天文学」
K. I. ケラーマン (小尾信弥訳) 日経サイエンス,
1972年4月号 pp. 94—107.
 2. 「Very Long Baseline Interferometry」
M. H. Cohen, Annual Review of Astronomy
and Astrophysics, 1970, p. 620.
 3. 「Introduction to Very-Long-Baseline Inter-

ferometry]

M. H. Cohen, Proc. IEEE Vol. 61, No. 9. Sep. 1973, pp1192—1197.

4. 「Very-Long-Baseline Interferometry Technique Applied to Problems of Geodesy, Geophysics, Planetary Science, Astronomy and General Relativity」
C. C. Counselman, III, Ibid. pp.1225—1230.
 5. 「An Analysis of Long Baseline Radio Interferometry」
J. B. Thomas, Deep Space Network Progress Report, Technical Report 32—1526, Vol. VII, February 15, 1972.
 6. 「An Analysis of Long Baseline Radio Interferometry II」
J. B. Thomas, *ibid.* Vol. VIII, April 15, 1972.
 7. 「An Analysis of Long Baseline Radio Interferometry, Part III」
J. B. Thomas, *ibid.* Vol. XVI, August 1973.
 8. 「Very Long Baseline Interferometry and Its Sensitivity to Geophysical and Astronomical Effects」
J. G. Williams, Space Programs Summary, 37—62, Vol. II, March 31, 1970.
 9. 「Investigation of continental drift, Phase-I Effort」
C. G. Lehr, U. B. Marvin, P. A. Mohr, 他, 1968, Apr. 1—Sep. 30, Nov. 1968. (NASA—SAO series) Contract NSR 09—015—079.
 10. 「Investigation of Continental drift, Phase-II Effort」
M. D. Grossi, et al., 1968, Oct. 1—1969, Mar. 15, Apr. 1969 (NASA—SAO series) Contract NSR 09—015—079. Final Report.
 11. 「VLBI (Very Long Baseline Interferometer)」
上屋淳, 「地球回転」「子午環」シンポジウム研究集録, pp. 8—22, 1973年11月20—22日.
 12. 「VLBI観測の現状」中島浩一, *ibid.*, pp. 23—28.
 13. 「VLBI」面高俊宏, 電波天文観測法の展望, 宇電懇・豊川シンポジウム集録, pp. 64—67, 1973年12月3・4日.
- B. 記録およびデータ処理
14. 「Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase-delay measurements」
A. E. E. Rogers, Radio Science, Vol. 5, No. 10, Oct, 1970.
 15. 「A one-bit VLBI recording and playback system using video tape recorder」
R. D. Michelini, *ibid.* pp.1263—1270.
 16. 「Study of VLBI Data Recording Techniques」
J. Ramasastry and R. D. Michelini, G. S. F. C. June 1973.X—592—73—165.
 17. 「The NRAO Tape-Recorder Interferometer System」
B. G. Clark, Proc. IEEE Vol. 61, No. 9. Sep. 1973.
 18. 「The Spectrum of Clipped Noise」
J. H. Van Vleck and D. Middleton, Proc. IEEE, Vol. 54, No. 1, pp.2—19, Jan. 1966.
- C. 周波数および時刻標準, 時刻同期
19. 「Using Loran-C transmissions for long baseline synchronization」
L. D. Shapiro and D. O. Fisher, Radio Science Vol.5, No. 10, Oct. 1970, pp. 1233—1238.
 20. 「Oscillator synchronization via satellite」
L. E. Wood and M. C. Thompson. Jr., *ibid.* pp.1249—1252.
 21. 「VLBI Clock Synchronization Tests Performed via the ATS—1 and ATS—3 satellites」
J. Ramasastry, B. Rosenbaum, R. D. Michelini and G. Kuegler, G. S. F. C. X—553—71—514, Dec. 1971.
 22. 「Evaluation of a system for remote oscillator synchronization」
L. E. Wood, M. C. Thompson, H. B. Janes and D. Smith, U. S. Department of Commerce, Institute for Telecommunication sciences, Telecommunications Research and Engineering Report 29, March 1972.
 23. 「Hydrogen-maser time and frequency standard at Agassiz Observatory」
M. W. Levine and R. F. C. Vessot., Radio Science, Vol. 5, No. 10, pp.1287—1292, Oct, 1970.
 24. 「TV信号を利用した時刻と周波数の精密比較」
佐分利義和, 安田嘉之, 小林三郎, 佐藤得男, 電波研究所季報, 第18巻第99号, 昭和47年11月号.

D. 人工衛星の軌道決定

25. 「ATS C—2 satellite VLBI experiment」
J. Ramasastry and B. Rosenbaum, G. S. F. C. X—553—72—252. June. 1972.
26. 「The VLBI time delay function for synchronous orbits」
B. Rosenbaum, G. S. F. C. X—553—72—286, July 1972.
27. 「Tracking of the ATS—3 Synchronous satellite by the VLBI technique」
J. Ramasastry, B. Rosenbaum, R. D. Michelini, D. Frost, S. Ross and A. Boornazian X553—72—290, July 1972.
28. 「Interferometric observations of an artificial satellite」
R. A. Preston, R. Ergas, H. F. Hinteregger, C. A. Knight, D. S. Robertson, I. I. Shapiro, A. R. Whitney, A. E. E. Rogero and T. A. Clark, Science Vol. 178, 27. Oct. 1972.

E. 測地学, 地震学への応用

29. 「GSFC/SAO VLBI experiments for geodynamic applications」
J. Ramasastry, B. Rosenbaum, R. D. Michelini, D. Frost, S. Criswell, S. Ross, A. Boornazian, J. Shaw, J. P. Richard, C. Ma and P. C. Davis, X—592—73—104. Apr. 1973.
30. 「Radio Interferometry: Feasibility Demonstration for Monitoring Tectonic Motions」
J. B. Thomas, J. L. Fanselow, P. F. Mac Doran, D. J. Spitzmesser and L. Skjerve (A compendium of J. P. L. Research) Presented at the American Geophysical Union meeting, 5 Dec. 1972. San Francisco, Calif.
31. 「The Goldstone Interferometer for Earth Physics」
J. L. Fanselow, P. F. Mac Doran, J. B. Thomas, J. G. Williams, C. J. Finnie, T. Sato, L. Skjerve, D. J. Spitzmesser, Deep Space Network Progress Report, Technical Memorandum 32—1526, Vol. V, Oct. 15, 1971.

F. 大気による影響

32. 「The estimation of tropospheric electrical path length by microwave radiometry」
L. W. Schaper, Jr., D. H. Staelin, and J. W. Waters, Proc. IEEE, Vol. 58, pp. 272—273,

Feb. 1970.

33. 「Atmospheric effects in very long baseline interferometry」
N. C. Mathur, M. D. Grossi and M. R. Pearlman, Radio Science, Vol. 5, No. 10, Oct. 1970, pp. 1253—1261.

G. 長波長でのVLBI

34. 「Long wavelength VLBI」
T. A. Clark and W. C. Erickson Proc. IEEE, Vol. 61, No. 9, Sep. 1973.
35. 「Very long baseline interferometry of Jupiter at 18MHz」
T. D. Carr, M. A. Lynch, M. P. Paul, G. W. Brown, J. May, N. F. Six, V. M. Robinson, and W. F. Block, Radio Science Vol. 5, No. 10, pp. 1223—1226, Oct. 1970.
36. 「Very long baseline interferometry of decametric radiation from Jupiter」
K. M. Stannard, G. A. Dulk and B. Rayhrer ibid. pp. 1271—1280.
37. 「A decametric long baseline interferometer system」
H. H. Gargent III and W. K. Klemperer, ibid, pp. 1283—1286.

H. 線スペクトル観測への応用

38. 「Very long baseline interferometry of galactic OH sources」
B. O. Ronnang, O. E. H. Rydbeck and J. M. Moran, ibid pp. 1227—1231.
39. 「Very Long Baseline Interferometric study of the Water-Vapor Emission regions in Orion A」
G. D. Papadopoulos, B. F. Burke, P. R. Schwartz, K—Y, Lo, and D. C. Papa, MIT Quarterly Progress Report, Oct. 1971.
40. 「Spectral-Line Analysis of Very-Long-Baseline Interferometric Data」
J. M. Moran, Proc. IEEE, Vol. 61, No. 9, pp. 1236—1242, Sept, 1973.

I. その他

41. 「Apparent Angular Sizes of Discrete Radio Sources」
R. Hanbury Brown, R. C. Jennison, M. K.

- Das Gupta, Nature, No. 4338, p.1061—1063,
Dec. 20, 1952.
42. [Observations at Sydney]
B. Y. Mills, *ibid*, pp.1063—1064.
43. [Observations at Cambridge]
F. G. Smith, *ibid*, pp.1063—1064.
44. [The Radio Brightness Distributions over
Four Discrete Sources of Cosmic Noise]
Aust. J. Phys. Vol. 6, No. 4, pp.452—470,
1953.
45. [Frequencies for Very Long Baseline Inter-
ferometry]
Annex 3, IUCAF/205, Annexes p.2, 20 Sep.
1973.

