

II-1 概 説

川 口 則 幸*

(昭和59年7月3日受理)

1. はじめに

電波研究所では過去にK-1, K-2という2つのVLBIシステムを製作し、実験を行ってきた^{(1), (2)}. K-1システムでは基本的な相関検出技術を学び、K-2システムでは帯域幅合成という手法を用いて遅延決定精度を飛躍的に向上させる技術を学んだ. K-3型VLBI観測システムはこれらの習得された基礎技術のすべてを投入し、かつ超高安定な水素メーザ原子周波数標準器も新たに導入し、米国の最新VLBIシステムMark IIIシステムから多くのものを学び取り入れ、5ヶ年間の歳月をかけて製作された. このようにして昭和59年9月に完成されたK-3システムは、Mark IIIシステムと完全な整合性を有しているのみならず独自の工夫も随所になされ、VLBI観測データの品質評価に必要な基礎データの取得が容易に行えるようにも配慮されている. また、将来のさらに進んだシステムの研究開発に役立つような装置も多く含んでいる.

本特集号ではII-2からII-11にかけてK-3型VLBI観測システムを構成する各装置の紹介とその特性・機能について詳述する. また、II-12, II-13では24時間以上もの長時間にわたって実施されるVLBI観測を、上記装置群を制御しながら自動的に実行してゆく自動運用ソフトウェア(KAOS)及び計算機システムについての紹介がなされる. そこで本概説では、個々に詳述される装置の性能に基づき、K-3型VLBI観測システムの総合性能指数である相関検出感度について明らかにする. この相関検出感度は、米国の主要なVLBI観測局であるモハービ局、オーエンズバレー局のそれと比較される. さらにここで得られた結果は本特集号V-1で用いられ、実際の日米試験観測結果と比較される.

2. 相関検出感度

VLBIでは、同一の電波源から放射されている電波を2局(注1)で受信し、受信信号間の相関を最大にする遅延時間差から、電波の2局への到達時間差を求める(本

特集号III-1参照). そしてこの電波の到達時間差から2局間の距離や位置関係、地球の回転軸の方向や回転速度、2局で使用している時計のずれ、等の各種物理量を求める. 従って品質の良い相関を得ることがまず第一に必要であり、VLBI観測システムに要求される基本性能となる. しかし電波源からの信号は極度に微弱で、受信データのうちの大部分は相関のない2局のシステム雑音で占められる. 検出される相関の大きさに比例して遅延決定精度が良くなる⁽³⁾ことから、限られた電波源強度の中でいかに大きな相関を検出できるかがVLBI観測システムの性能指標となり、ここでは、これを相関検出感度と呼ぶ.

さて受信データ中相関のとれる信号の全信号に対する割合(通常相関振幅と呼ばれ、 ρ で記述される.)は次式で書き表すことができる.

$$\rho = \sqrt{\frac{T_{a1}T_{a2}}{(T_{s1}+T_{a1})(T_{s2}+T_{a2})}} \quad \dots\dots(1)$$

ここで T_{a1} , T_{a2} は等価雑音温度で表された2局での電波源受信強度, T_{s1} , T_{s2} は2局の受信系システム雑音温度である. 受信信号雑音温度 $T_{ai}(i=1, 2)$ (K) は、電波源の電波放射強度 S_c ($\text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) から次式で与えられる⁽⁴⁾.

$$\left. \begin{aligned} T_{ai} &= \frac{S_c A_{ei}}{2k} \\ &= \frac{S_c}{2k} \pi \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \eta_i \\ &= \frac{\pi S_c}{8k} D_i^2 \eta_i \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

A_{ei} : 2局の実効アンテナ開口面積

($i=1, 2$) (m^2)

D_i : 2局のアンテナ開口径 ($i=1, 2$) (m)

η_i : 2局のアンテナ開口効率 ($i=1, 2$)

k : ボルツマン定数 ($\text{WK}^{-1}\text{Hz}^{-1}$)

この式を(1)式に代入し、 $T_{si} \gg T_{ai}(i=1, 2)$ を考慮すると、

$$\rho = \frac{\pi S_c}{8k} \cdot \frac{D_1 D_2 \sqrt{\eta_1 \eta_2}}{\sqrt{T_{s1} T_{s2}}} \quad \dots\dots(3)$$

となる. (3)式で表される相関振幅は、受信系が熱雑音を発生する以外は理想的で完全な場合であって、実際には

* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

(注1) 複数局が参加するVLBI観測であってもすべての2局の組合せから検出される相関が基になる。

積分時間内で、周波数変換装置の局部発振源の不規則な周波数揺らぎや大気による位相シンチレーション、データの相関処理過程に起因するもの等による相関振幅の低下が見込まれる。これらによる相関係数の低下を L_c ($0 \leq L_c \leq 1$) とすると、(3)式は次のように書き改められ、

$$\rho = \frac{\pi S_c}{8k} \cdot \frac{D_1 D_2 \sqrt{\eta_1 \eta_2} \cdot L_c}{\sqrt{T_{s1} T_{s2}}}$$

但し $L_c = L_{c1} \cdot L_{c2} \cdots L_{ci} \cdots$

となる。 L_c はコヒーレンスファクタと呼ばれ、各装置やデータ処理過程等で生じる相関振幅の低下 L_{ci} の積となる。各々の相関振幅の低下については 3. で詳説する。相関検出感度は、 1Jy ($=10^{-26}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) の強度を持つ電波源の観測から得られる相関振幅で定義され、(4)式に $S_c = 10^{-26}$, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ を代入することにより

$$(\rho/S_c)_{\text{dB}} = 2.85 \times 10^{-4} \frac{D_1 D_2 \sqrt{\eta_1 \eta_2} L_c}{\sqrt{T_{s1} T_{s2}}} \cdots (5)$$

と表される。この式は、2局で構成される VLBI 観測システムの相関検出感度を与え、 i 番目の観測局のみの相関検出感度は $D_1 = D_2 = D_i$, $\eta_1 = \eta_2 = \eta_i$, $T_{s1} = T_{s2} = T_{si}$ において

$$(\rho/S_c)_i = 2.85 \times 10^{-4} \frac{D_i^2 \eta_i L_c}{T_{si}} \cdots (6)$$

となる。 i 番目及び j 番目の観測局を任意に組み合わせた VLBI 観測システムの相関検出感度は、各局の相関検出感度の相乗平均として与えられ、次式で表される。

$$(\rho/S_c)_{ij} = \sqrt{(\rho/S_c)_i (\rho/S_c)_j} \cdots (7)$$

(6)式から明らかなように、相関検出感度の高い VLBI 観測システムとは開口径が大きくかつ開口能率の高いアンテナ及び低雑音の受信系を持った、コヒーレンスファクタが 1 に近いシステムであると言える。

3. K-3 型 VLBI 観測システムとその相関検出感度

K-3 型 VLBI 観測システムは鹿島支所に既設の 26m アンテナを中心にして構成されている。26m アンテナは従来の 4GHz 帯受信用から日米 VLBI 実験に必要な 2GHz/8GHz 帯受信用へと改造されたが、改造にあたっては特に開口能率を重視し、それを劣化させる一因である給電損失を小さくすることに努力が払われた(本特集号 II-2 参照)。給電損失を小さくすることができればアンテナ雑音温度も低く抑えることができるので、VLBI 用アンテナとしては特に重要な性能ファクタとなる。更に主反射鏡のスピルオーバー等によるアンテナ雑音温度の上昇にも注意を払わなければならない。

II-3 では 26m アンテナの駆動系、プログラム追尾系

について詳述されているが、そこでは特に電波源の追尾精度に注意を要する。(6)式の相関検出感度の計算では、電波源は常にアンテナビームの中心に捕捉されて追尾されることを暗に仮定しているが、もしこの追尾精度がビーム幅に比べて無視できない量になると、受信信号強度が低下し相関検出感度が低下する。追尾誤差を δ (度)、ビーム幅を θ_{HPBW} (度) とするとこの低下率 L_{lrk} (dB) は、

$$L_{lrk} = -\frac{10\sqrt{2\ln 2}}{\ln 10} (\delta/\theta_{HPBW})^2 \text{ (dB)} \cdots (8)$$

となり、ビーム幅の 1/10 の追尾誤差で 1.2% の受信強度低下となる。

II-4 では K-3 型 VLBI 観測システム各装置のうちフロントエンド部について述べているが、そこで重要な特性は、前置増幅器の雑音温度、周波数変換装置の局部発振周波数安定度があげられる。前者はアンテナ雑音温度とともに受信系システム雑音 ((6)式の T_{si}) の主要部を構成する。後者はコヒーレンスファクタ L_c を 1 より低下させる要因の 1 つとなっている。

II-5 では、IF 分配器、ビデオ変換器、記録信号発生器等のバックエンド部について述べているが、ここでは各種フィルタの特性、ビデオ変換器の局部発振部位雑音、サンプリングの不感帯等がコヒーレンスファクタ低下の要因として問題になる。II-4, II-5 ではこのコヒーレンスファクタの実測が試みられている。

II-6 ではデータレコーダについて述べている。データは一旦磁気テープ上に記録されてから、再生・相関処理される。この記録・再生の過程でデータにエラーが生じると、コヒーレンスファクタを低下させる。そこでここで重要な特性はビットエラーレート (B. E. R.) となる。

II-7 では、VLBI 観測装置の心臓部とも言うべき水素メーザ原子標準器について述べている。ここから出力される 10 MHz の標準周波数信号がすべての装置の位相基準となっているので、その安定度は特に重要である。これによるコヒーレンスファクタの低下は積分時間に依存しており、水素メーザ原子周波数標準器は VLBI における相関積分時間、すなわち数分から数時間において最も良い安定度を示し、VLBI にとって最適な周波数標準器になっている。

以上で本特集号の II. で紹介されている K-3 型 VLBI 観測装置の各特性と相関検出感度の関係を述べてきたが、特にコヒーレンスファクタについては文献(3)において更に詳しく解析・検討がなされており、そこに与えられている予測値と、本特集号 II-4, II-5 でなされたコヒーレンスファクタの実測結果を第 1 表に示す。

第1表 K-3型 VLBI 観測システムのコヒーレンスロス

K-3型 VLBI 観測システム名	コヒーレンスロス発生原因	予測コヒーレンスロス	実測コヒーレンスロス
フロントエンド	周波数変換装置局部発振器	0.6%	15.4%
バックエンド	ビデオ変換器局部発振器	0.1%	2.5%
	ビデオ変換器イメージ抑圧ミキサ	1.1%	
	ビデオ変換器ビデオ帯フィルタ	1.3%	
	記録信号発生器サンプラ	0.4%	
	折返し雑音の逆フリンジ回転	2.0%	—
	1ビットサンプリング	36.3%	—
データレコーダ	記録, 再生エラー	2.0%	—
相関処理	フリンジ回転の3レベル近似	4.0%	—
	不連続遅延追尾	3.4%	—
K-3型 VLBI 観測システム総計		45.2%	53.2%*

* 実測データのないものについては予測値をそのまま用いた。

第2表 VLBI 観測局のアンテナ・受信系の特性

項目	局名			
	鹿島局	モハービ局	オーエンズバレー局	
アンテナ開口径	26m	12.2m(40')	39.6m(130')	
アンテナ開口能率	8GHz帯	53%	45%	40%
	2GHz帯	52%	47%	40%
システム雑音温度	8GHz帯	100K	60K	180K
	2GHz帯	130K	74K	100K

第1表ではコヒーレンスファクタ L_c から、 $1-L_c$ と定義されるコヒーレンスロスを百分率表示したものが与えられている。表から明らかのように、フロントエンド部での実測コヒーレンスロスが予測値よりも大きくなっているが、これは予測計算では考慮されていない未知の位相雑音が局部発振源に含まれているものと思われ、現在検討が進められている。

第2表に、鹿島局及び米国の代表的な VLBI 観測局であるモハービ局、オーエンズバレー局のアンテナ・受信系の特性を示す。各観測局の相関検出感度は、第1表、第2表の測定値を(6)式に代入することで求められ、その結果を第3表に示す。同表には相関検出感度の外に遅延決定係数、所要電波源強度も与えられている。ここで遅

延決定係数とは、1 Jy の強度を持つ電波源の観測から求められる遅延の決定精度を意味し、所要電波源強度とは0.1ナノ秒の目標精度で遅延を決定するために必要な電波源強度である。すなわち所要電波強度が小さい程感度の高い観測システムであると言える。以上の計算においては、Sバンド6チャンネル、Xバンド8チャンネルを帯域幅合成して遅延を決定するモードC観測(II-5, III-5参照)が想定され、相関積分時間は6分とした。

第3表から明らかのように鹿島局のアンテナ開口径(26m)はオーエンズバレー局(39.6m)よりも小さいにもかかわらず、感度、つまり0.1ナノ秒の遅延決定精度を達成するために必要な電波源強度は、ほとんど同じになっている。これは、遅延の決定に大きな役割りを果

第3表 VLBI 観測局の相関検出感度

項目	局名 周波数	鹿島局		モハービ局		オーエンズバレー局	
		2GHz帯	8GHz帯	2GHz帯	8GHz帯	2GHz帯	8GHz帯
相関検出感度 (%/Jy)		0.0360	0.0477	0.0126	0.0149	0.0835	0.0464
モードC観測における遅延決定係数 (psec·Jy)		25.5		80.7		24.7	
所要電波源強度 (Jy)		0.255		0.807		0.247	

第4表 系統的遅延変化補正誤差

系統的遅延変動の発生要因	補正装置	誤差感度	測定誤差	補正誤差
水蒸気成分を除く大気による伝搬遅延	気圧計	7.6psec/mbar	0.2mbar	1.5psec
水蒸気成分による伝搬遅延	水蒸気ラジオメータ	27psec/K	1K	27psec
局内遅延	局内遅延較正器	2.5μsec/sec	1μsec	2.5psec

たす 8GHz 帯の相関検出感度を良くするために、この周波数帯での開口能率やシステム雑音温度を下げるよう特に注意が払われた成果であると考えられる。

実際の VLBI 観測では 1 Jy 以上の強度を持った電波源を観測することが多いので、第3表に掲げられている VLBI 観測局の相関検出感度は鹿島局も含めすべて満足できるものになっている。

4. 系統的遅延変動とその補正装置

3. ではランダムな雑音により相関振幅が低下し、遅延決定精度が劣化する現象を取扱い、相関検出感度を定義した。VLBI で測定される遅延時間にはこのランダム雑音に起因する測定誤差の外に、系統的に変動する誤差成分も含まれる。その代表的なものは局内遅延変動と対流圏伝搬遅延変動で、前者は受信機やケーブルの温度変化による特性変化によって生じ、後者は大気中に含まれている水蒸気量の変動によって生じる。そこで K-3 型 VLBI 観測システムには、この系統的遅延変化を補正するための装置が用意されており、それぞれ局内遅延較正器、水蒸気ラジオメータと呼ばれ、本特集号 II-8, II-11 で詳しい紹介がなされている。

これらの補正装置を使用することによって系統的遅延変化は取り除かれるが、補正装置自身の持つ測定誤差が新たに加わる。第4表に各補正装置の測定誤差、誤差感度並びに補正誤差を掲げる。これらの補正誤差は 3. で得た遅延決定精度を劣化させる新たな要因として付け加えられるが、中でも水蒸気ラジオメータによる誤差が大きく総合の遅延決定精度を大きく劣化させる。VLBI 観

測システムのうちこの水蒸気ラジオメータの特性改善が今後に残された最大の課題になっている。

以上述べた系統変動は、VLBI を測地目的として応用しはじめた当初からその存在が予測され、その補正装置の検討、研究開発が進められてきた。近年この外にアンテナ遅延の観測仰角に依存する系統的変動が指摘されその定量的評価が行われはじめた⁽⁶⁾。アンテナ遅延(本特集号 II-2 参照)とは、主反射鏡、副反射鏡等によって到来波を反射させながら焦点に収束させてゆくため、直接到達するものよりも遅れて受信されることにより生じる。特に主反射鏡面や副反射鏡の位置は重力の影響を大きく受けるため、観測仰角によってこのアンテナ遅延が変動するおそれがある。そこで K-3 型 VLBI 観測システムの中には、本特集号 II-10 に詳述されている遅延基準用標準受信装置が用意され、26m アンテナの副反射鏡の背面に設置されている。この受信装置には開口径の小さなホーンアンテナを使用しているので、これによる遅延変動は全仰角範囲で一定とみなせる。そこで 26m アンテナ・主受信系と遅延基準用標準受信装置間の遅延を通常の VLBI と同様の手法を用いて測定し、その変化を求めれば 26m アンテナ系での遅延変動を定量的に評価できる。このような測定は、精密な時刻同期を目的とした VLBI 実験においても必要とされ、そのデータの取得が急がれている。

5. K-3 型 VLBI 観測システムの運用

4. までは、主として K-3 型 VLBI 観測システムを構成する個々の装置の機能・性能と総合性能との関連に

ついて話が進められてきた。そして個々の装置の性能が我々の最終目標である0.1ナノ秒の遅延決定に十分なものであることを見てきた。しかし実際に0.1ナノ秒以下の誤差で遅延を決定し、日米間の距離を3cm以内の誤差で求めるためには、これらの装置を有効かつ適切に運用し、24時間以上にもわたるVLBI観測を円滑に進めてゆかなければならない。制御すべき装置は20台に及び制御項目は百数十項目にも達する。本特集号II-12, II-13に述べられている計算機システム及び自動運用ソフトウェア(KAOS)は全K-3型VLBI観測システムを統括的に制御し実験を遂行してゆくとともに実験中の各機器の状態を監視しログデータとして残してゆく。従って、磁気テープの交換だけが人手を介してなされる唯一の作業となる。

VLBI観測を行うにあたって、上述の自動運用システムと並んで重要なものに観測局間の時刻同期がある。もし観測局の時刻間にずれがあると相関が、予測される遅延時間の周辺で得られないために、観測後の相関・一次処理を円滑に行えなくなる。K-3型相関処理装置では相関のとれる遅延時間の窓が2マイクロ秒になっているので、この時間内で時刻同期をとることが最低限必要とされる。またいったん時刻同期を精密にとっても観測局での時系の維持が十分になされていないと、しばしば時刻同期をとり直さなければならない。本特集号II-9には、鹿島VLBI観測局における時系維持システムと時刻同期系が詳しく述べられており、日本標準時に対する鹿島局の時系のずれがいついかなる時点においても正確に求められるようになっている。

またそこには米国との時刻同期の方法や、時刻同期誤差についても詳しく述べられている。

現在、VLBI観測システムの運用経費の大半は磁気テープの購入費であるとさえ言われている。それは1時間のVLBI観測で約1巻から1.5巻の磁気テープが消費され、日米実験等の大がかりな実験ともなると1回あたり200巻もの磁気テープが必要となるからである。さらに使用される磁気テープには高密度記録に必要な高保持力テープ(本特集号II-6参照)が用いられるので1巻あたりのコストが通常の計算機用磁気テープに比べて比較にならないほど高価なものになっている。そこでII-6にも述べられているようにデータレコーダを更に高密度記録できるものに改良し、必要なテープの数を減らすことが緊急な課題となっている。我々は現在7倍の高密度化を計画しているが、もしこれが実現すれば運用経費の軽減だけでなく、磁気テープの輸送経費の削減、観測時

のテープ交換回数の減少等、おそらくVLBI観測システムの運用に革命的な大変革がもたらされるであろう。

6. おわりに

本概説では、K-3型VLBI観測システムの総合性能指標である相関検出感度を、個々の装置の性能から導き出した。各装置の詳細は本概説以降の各論文を参照されたい。この相関検出感度の予測から、K-3VLBIシステムがこれより開口径の大きなアンテナを有するオーエンズバレー局と比べても同程度の感度を有することが分かった。この事は、本特集号V-1で述べられているように日米試験観測結果でも確認され、今後実施が予定されている日米VLBI本実験に向けて大きな自信と裏づけを与えた。まさに鹿島VLBI観測局は、世界のVLBI網の中の重要な基地局の1つとしての資格を得たと言え、今後のVLBIの発展の重要な一翼を担ってゆくことになる。

最後に、5ヶ年間に及ぶK-3型VLBI観測システム開発計画の中で常に暖かい御指導と適切な御助言をいただいた若井登電波研究所長、佐分利義和元VLBIシステム研究開発本部長、高橋耕三元VLBIシステム研究開発センタ長・現VLBI実験実施センタ長を始めとする所内幹部の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 川尻, 尾嶋, 梅津, 河野, 高橋; "VLBI 国内基礎実験システム", 電波季 超長基線電波干渉計 (VLBI) 実験特集号, 24, 130, September 1978.
- (2) Kawano, N., Takahashi, F., Yoshino, T., Koike, K., Kumagai, H., and Kawajiri, N.; "Development of Real-Time VLBI System and Measurements of Scintillation", J. Radio Res. Labs. 29, 127, p. 53, July 1982.
- (3) Kawaguchi, N.; "Coherence Loss and Delay Observation Error in Very Long Baseline Interferometry", J. Radio Res. Labs. 30, 129, p. 59, March 1983.
- (4) Kraus, J.D.; "Radio Astronomy", MacGraw-Hill, 1966.
- (5) Otoshi, T.Y., Young, L.E.; "An Experimental Investigation of the Changes of VLBI Time Delays Due to Antenna Structural Deformation," TDA Progress Report 42-68, January and February 1982.