

II-2 26 m アンテナ・給電系

川口 則幸*, 雨谷 純*

(昭和59年7月3日受理)

1. はじめに

鹿島支所の26 m アンテナは各種衛星実験やK-1, K-2システムによるVLBI実験に使用されてきたが, 受信周波数帯を4 GHz帯から2/8 GHz帯に変更し, 日米共同VLBI実験に使用されることになった。

受信周波数帯の変更は給電系の交換だけで行われ, アンテナ光学系は4 GHz帯で最適設計されたものがそのまま使用された。このため, 2/8帯における利得低下が心配される。特に2 GHz帯ではホーンリフレクタ1次給電部のテーパ最終径が4 GHz帯で最適になるように設計されていたので径が小さく損失が大きい。そこで従来の直線テーパ導波管をEIロータリジョイントを含めて損失の少ない曲線テーパ導波管と交換し利得低下を最小にするように工夫した。開口率率は給電系交換前の4 GHz帯及び交換後の2/8 GHz帯で3個の強い電波星Tau-A, Cas-A, Cyg-Aを観測することで実測され, 2 GHz帯で51.7%, 8 GHz帯で53.4%と4 GHz帯の57.7%よりも低いがいずれも50%以上の開口率率を得ることができた。また, アンテナの電気軸(利得が最大になるビーム方向)と機械軸(角度読取装置⁽¹⁾によって読取られたビーム方向)のずれはTau-A, Cas-A, Ori-A, Cyg-A, Vir-Aの5個の強い電波星の観測を行い, それらの電波星方向を基準にして角度読取装置の校正を行った。その結果, 標準偏差0.003°で軸校正パラメータを決定できた。

本稿ではまず26 m アンテナの光学系をレビューし, VLBI観測で重要となるアンテナ遅延の予測を行う。次に2/8 GHz帯給電系の構成について述べ, 開口効率の測定及び軸校正の測定結果についてもふれる。

2. 26 m アンテナの光学系とアンテナ遅延

26 m アンテナの外観を第1図に示す。副反射鏡の背面に見える装置は遅延基準用標準受信装置⁽²⁾で, アンテナ・給電系での受信信号の遅延(アンテナ遅延)や, その仰角変化による変動を測定するためのものである。

第2図に26 m アンテナの光学系を示す。図中 l の準

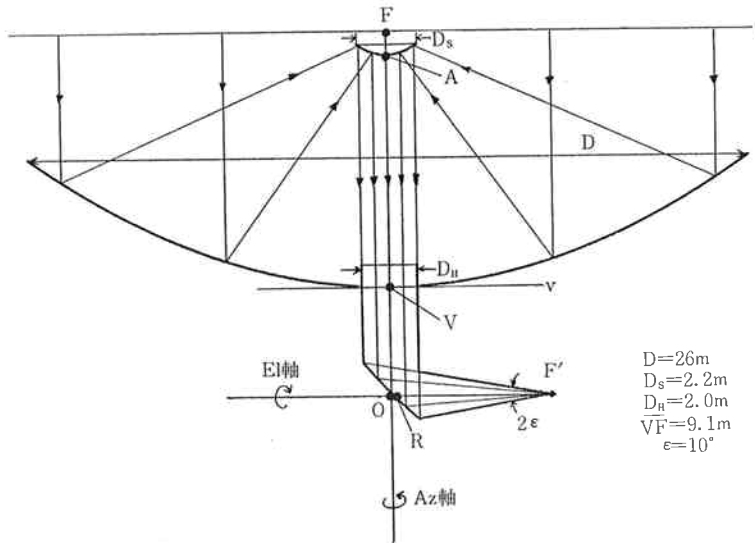


第1図 26mアンテナの外観

線で示された平面波は主反射鏡のパラボラ面により図中Fの焦点方向に集光される。途中主反射鏡と焦点Fを共有する副反射鏡のパラボラ面で一端平面波に変換された後開口径2 m, フレア角20°のホーンリフレクタで更に集光され, 給電点F'に達する。26 mアンテナ光学系は以上のように3枚のパラボラ面の組合せを基本として構成されているが, 開口率率を最大にするため主副反射鏡に鏡面修正が施されている⁽³⁾。

方位角(Az)軸と仰角(EI)軸が交叉する点, 図中点OがVLBIのベースライン基準点になっている。つまり, 準線 l で示される到来平面波が反射鏡で反射されずに点Oを通過する時刻がVLBIでいう「受信波の到達時刻」になる。2局のアンテナの受信波到達時刻差がVLBIで最も基本的な量である「幾何学的遅延時間差(τ_g)」を与える。

* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室



第2図 26mアンテナの光学系

$$\begin{aligned}
 D &= 26\text{m} \\
 D_s &= 2.2\text{m} \\
 D_H &= 2.0\text{m} \\
 \sqrt{F} &= 9.1\text{m} \\
 \epsilon &= 10^\circ
 \end{aligned}$$

図2からも明らかなように、到来波は主・副反射鏡及びホーンリフレクタで反射されるので直接O点に達するものに比べて遅れて受信される。この遅れをアンテナ遅延と呼ぶ。図中F'点から給電系、フロントエンド部⁽⁴⁾を経てバックエンド部内の記録信号発生器⁽⁵⁾でサンプリングするまでの遅延時間は局内遅延時間と呼ばれる。これらの遅延時間は観測局のアンテナの構造や使用している装置・ケーブル長が違ると異なり、それぞれアンテナ遅延時間差(τ_{ant})、局内遅延時間差(τ_{stn})が生じる。従って実際のVLBI観測で得られる遅延時間には、観測方程式の中で定式化されているベースラインベクトルと電波源方向の単位ベクトルとの内積、つまり幾何学的遅延時間差(τ_g)の他に未知の量として上記2つの遅延時間差、 τ_{ant} 、 τ_{stn} 及び時刻同期誤差(τ_{clk})が含まれている。 τ_g に付加されている遅延時間差のうち τ_{stn} は局内遅延較正器⁽⁶⁾によってその変化も含めて補正され、 τ_{clk} は観測方程式の中にその変動を表すパラメータを組み込むことによって除かれる。従ってもし τ_{ant} が一定であるならば、 τ_{ant} と変動分の除去されたあるエポックでの時刻同期誤差(τ_{clko})の和、($\tau_{ant} + \tau_{clko}$)は観測方程式の中の定数項となる。あるエポックでの時刻同期誤差は、VLBI観測によって求めたい重要な観測量のうちの1つである⁽⁷⁾。これを正しく求めるためには、観測方程式のうちの定数項として推定される($\tau_{ant} + \tau_{clko}$)から τ_{ant} を除いてやらなければならない。このためには時刻同期を目的とするVLBI観測に参加する全ての局のアンテナ遅延が明確になっていなければならない。もしくは遅延基準用標準受信装置⁽²⁾(第1図副反射鏡上部参照)をものさしとしてアンテナ遅延時間差(τ_{ant})の

実測を必要とする。

現在、遅延基準用標準受信装置を用いた26mアンテナのアンテナ遅延の実測が計画されているが、この実測結果と比較検討するためにも本稿では第2図の基本光学系からこの量の推定を行う。

τ_{ant} は図中の記号を使って次のように書ける。

$$\begin{aligned}
 c\tau_{ant} &= (\overline{IV} + \overline{VA} + \overline{AV} + \overline{vR} + \overline{RF'}) - \overline{IO} \\
 &= 2\overline{AV} + \overline{RF'} \quad \dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

ここで c は光速、 \overline{AV} は主・副反射鏡の頂点間の距離で、両者が焦点Fを共有するパラボラ面であることから

$$\overline{AV} = F(1 - D_s/D) \quad \dots\dots(2)$$

となる。 F 、 D は主鏡の焦点距離と直径、 D_s は副反射鏡の直径である。また F' がホーンリフレクタの焦点であることから $\overline{RF'}$ は

$$\overline{RF'} = \frac{D_H}{2 \tan \epsilon} \quad \dots\dots(3)$$

とホーン開口径 D_H 、ホーンフレア半角 ϵ を使って書ける。

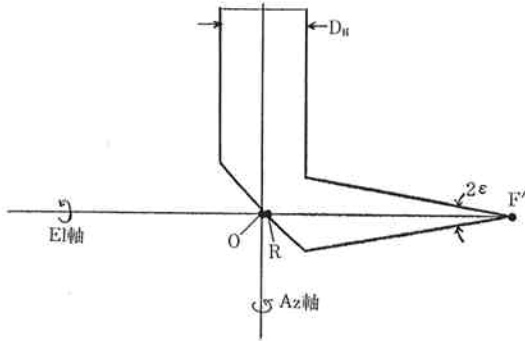
(2)、(3)式を(1)式に代入すると結局アンテナ遅延長 $c\tau_{ant}$ は

$$c\tau_{ant} = 2F(1 - D_s/D) + \frac{D_H}{2 \tan \epsilon} \quad \dots\dots(4)$$

となる。上式に図2に与えられている26mアンテナの諸元を代入すると

$$c\tau_{ant} = 22.33 \text{ m} (\tau_{ant} = 74.4 \text{ nsec}) \quad \dots\dots(5)$$

となることが分かる。この値はあくまでも鏡面修正前の基本光学系に基づいて計算されたもので、修正後の値に



第3図 ホーンリフレクタ部の拡大図

については調査中である。

第3図にホーンリフレクタ部の拡大図を示す。図からも明らかなように E1 軸と反射鏡面が交わる点 R から \overline{RO} だけ離れたところに VLBI 基準点 O がある。このずれ \overline{RO} はホーンリフレクタの諸元から

$$\left. \begin{aligned} \overline{RO} &= \frac{D_H}{4 \tan \epsilon} \left(2 - \sqrt{\gamma} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \right) \\ \gamma &= \frac{1 + \sin \epsilon}{1 - \sin \epsilon} \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

となり、第2図の 26 m アンテナ基本光学系諸元を代入することにより

$$\overline{RO} = 8.75 \text{ cm} \quad \dots\dots(7)$$

となる。ホーンリフレクタの反射盤の厚さや反射面点検カバーの厚さを考えるとほぼこの \overline{RO} の値になるので、VLBI 基準点はホーンリフレクタ反射面点検カバーの外壁面上にあると言ってもよいであろう。

この点は光波測距儀を使って建設省国土地理院により精密測量され、そのベッセル座標系での値を第1表に示す。

第1表 26mアンテナの基準点位置

(日本測地座標系, 昭和59年1月測定)

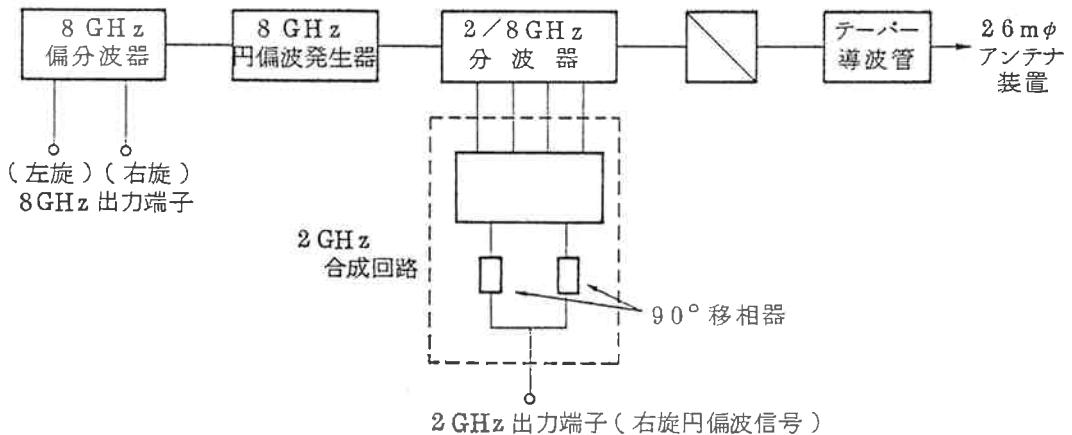
緯度	35° 57' 3".20
経度	140° 39' 57".83
ジオイド高	45.46m

3. 26 m アンテナ給電系の構成

第4図に旧 4 GHz 帯給電系と置換された 2/8 GHz 帯給電系の構成を示す。ホーンリフレクタと 2/8 GHz 帯分波器を整合させるテーパ導波管は E1 ロータリジョイントと共に交換された。テーパ導波管には曲線テーパ導波管を採用したため最短の軸長でホーンフレア角と一致させることができ低 VSWR 特性が得られた。

2 GHz 帯の信号は、テーパ導波管に設けられた結合孔から、テーパ導波管のカットオフ特性を利用して分波される。この方式により広帯域、高効率な 2 GHz 帯の分波が行える(第5図参照)。2 GHz 帯の結合孔は 8 GHz 帯に対しては金属壁面と等価になるように設計されているので、テーパ導波管を損失することなしに通過した 8 GHz 帯の信号は、45° の傾きを持った誘電体板ポラライザにより右旋と左旋の円偏波に分離され、8 GHz 帯分波器からそれぞれ出力される。2 GHz 帯信号の偏波分離は 2 GHz 合成回路で行われる。2/8 GHz 分波器で分波された直交する 2つの 2 GHz 帯信号は、導波管型 90° 移相器で位相シフトされた後、同相合成されて右旋円偏波信号となる。逆相合成されて作られた左旋円偏波信号は、現在は無反射終端器で終端されているが、将来 8 GHz 帯の受信系と同様に独立して受信できるように配慮されている。

第2表に本給電装置の設計目標値及び実測値を示す。VSWR, 軸比, 挿入損失の全ての項目にわたって目標を EL ロータリジョイント

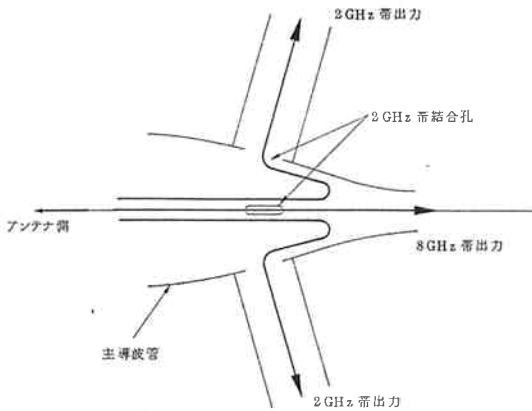


第4図 2/8 GHz 帯給電系構成図

第2表 2/8 GHz 帯給電装置主要性能

項目	2 GHz 帯	8 GHz 帯
周波数範囲	2.2~2.32GHz	7.86dB~8.6GHz
V S W R	1.25以下(1.09以下)	1.25以下(1.09以下)
偏波	右旋円偏波	右旋および左旋円偏波
交差偏波識別度	30dB 以上 (37.2 以上)	30dB 以上 (34.7dB 以上)
損失	0.5dB 以下 (0.175dB 以下)	0.5dB 以下 (0.18dB 以下)

() 内実測値



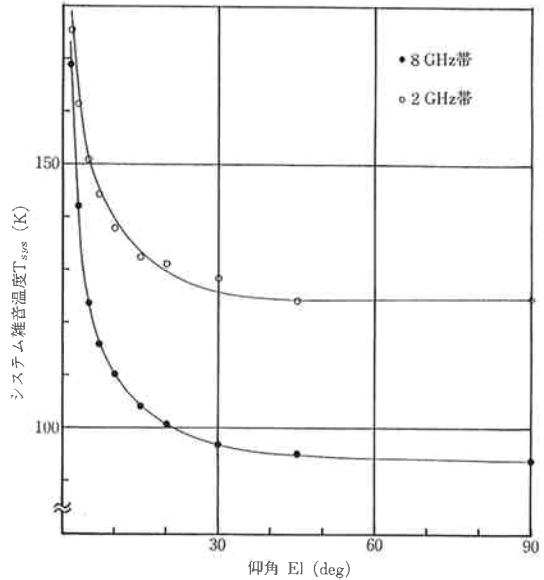
第5図 2/8 GHz 帯分波器の動作原理

上回る特性が得られた。特に挿入損失を小さくすることができたのでアンテナ雑音温度が下がり、VLBI 観測における遅延決定精度を予測より向上させることができた。

4. 26 m アンテナの開口効率

26 m アンテナは当初 4 GHz 帯で最適になるように鏡面設計がなされていたので、今回の 2/8 GHz 帯への改造で 2 GHz 帯では波長に比較してホーンリフレクタ開口径、副反射鏡直径が小さくなることによる開口効率の低下が、8 GHz 帯では鏡面精度による効率低下がそれぞれ心配された。

そこで改造前と改造後で測定周波数は異なるものの同一の電波源、同一の測定法を使って開口効率の測定を行った。観測は赤緯オフセット待受け法によって行われ⁽⁶⁾、受信電力の変化はパワーメータで測定し計算機でデータ収集を行った。8 GHz 帯受信系のシステム雑音温度はコールドロードを標準雑音源として Y ファクタ法で測定し、2 GHz 帯受信系については NF メータで、4 GHz 帯受信系では標準ノイズダイオードを使用して測定した。2/8 GHz 帯のシステム雑音温度はアンテナ仰角を変えた測定も行った。この結果を第6図に示す。特に Xバンドでは仰角による変化が大きく、観測仰角が 13° 近く



第6図 システム雑音温度の仰角特性

になる時もある日米 VLBI 実験ではこれによる S/N の変化に留意する必要がある。

計算機により収集された受信電力データから、アンテナビームの中心に電波源が入った時の Excess Noise Ratio, Y_s が

$$Y_s = \frac{T_{sys} + T_s}{T_{sys}} \quad \dots\dots(8)$$

で算出され、先に測定された受信系のシステム雑音温度 T_{sys} を使って T_s が求められる。 T_s とアンテナ実効開口面積、 A_e との間には

$$A_e = \frac{2kT_s}{S} \quad \dots\dots(9)$$

の関係 (k : ボルツマン定数, S : 電波源の強度) があるので、アンテナ開口効率, η は次式で求められる。

$$\eta = A_e / A_p = \frac{2k}{S} \cdot \frac{1}{A_p} \cdot T_s \quad \dots\dots(10)$$

ここで A_p は実開口面積 ($\pi D^2/4$; D は開口直径 = 26m) である。電波源の強度は文献(8)のものを引用した。

2/4/8 GHz 帯の各周波数帯で同一の電波源を観測したので少くとも相対的開口効率の低下は正確に求められる。

このようにして求められた各周波数帯での開口効率を第3表に示す。予想通り 4 GHz 帯で最も高く、2/8 GHz 帯ではやや効率の低下が認められるもののいずれも設計目標であった 50% 以上の効率を得られた。第3表には

4 GHz帯における過去の測定結果も示されている。1969年のものは26mアンテナ建設直後に測定されたもので1978年のものはECS実験のために給電系の一部改造を行った時に測定されたものである。表から明らかなように効率は年々低下する傾向にあり、1969年からの14年間で約5%の効率低下が見られる。この効率低下はおそらく鏡面の経年劣化であろうと思われるが、このように長期にわたって使用され、かつ電波星という共通の電波源を使って開口効率の測定が実施された例は他にあまりないので、アンテナの経年劣化に関する貴重なデータであると思われる。

第3表 26mアンテナの開口効率

測定年月	2.24GHz	4.08GHz	8.39GHz
1983年10月	51.7%	—	55.4%
1983年6月	—	57.5%	—
1978年	—	60.7%	—
1969年	—	62.6%	—

5. 26 m アンテナのビーム指向角の較正⁽⁹⁾

アンテナで電波星を受信する場合、角度読取装置によって計測されたビームの方向と真のビーム方向がずれていると、受信電力が低下し、電波星から放射されている電波を最大限有効に利用して相関処理を行い精度良く到達時刻差を求めることができない。

経緯儀型マウントの場合このずれは方位角軸が鉛直軸(局地的な鉛直偏差は除く)と一致していない事、方位角軸と仰角軸が直交していない事、ビーム指向方向が方位角軸と仰角軸でなす平面に垂直になっていない事、鏡面が重力によって歪を受ける事等によって発生するものや、角度読取装置のバイアス等によって生じた次式で示す7つのパラメータを使って記述される。

$$\left. \begin{aligned} Az &= Az_0 - \chi \sin(Az_0 + \omega) \tan El_0 \\ &\quad + \varepsilon \tan El_0 + \delta \sec El_0 + \Delta Az \\ El &= El_0 - \chi \cos(Az_0 + \omega) + g El + \Delta El_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

- ここで χ : Az 軸の鉛直軸からの傾度
- ω : Az 軸の傾いている方向の方位角
- ε : Az 軸と El 軸の非直交度
- δ : El 軸とビーム方向の非直交度
- g : 重力たわみによる歪係数
- ΔAz_0 : 角度読取装置の方位角誤差
- ΔEl_0 : 角度読取装置の仰角誤差

で Az_0, El_0 は角度読取装置から出力されるビーム指向角度、 Az, El が真のビーム指向角度を表す。この7つのパラメータが求められればビーム指向角度が較正されたことになるが、これを我々は次のようにして求めた。

まず利得測定と同様に強い電波星を全天にわたって観測する。電波星の位置は正確に分っているので最も強く受信される方向が真のビーム指向角度 (Az, El) となる。従ってこの値とこの時の角度読取装置の出力 (Az_0, El_0) とから最小自乗法によって(11)式の7つのパラメータを推定することができる。

1983年12月18日から3日間にわたって、電波源 Orion A, Cyg A, Virgo A, Cas-A を1回目観測して、粗較正を行い1984年1月12日から2日間にわたって Tau-A, Virgo A, Cyg-A, Cas-A, Orion A を精細に観測することで精較正を行い、2月14日から2日間にわたって Cas-A, Orion A, Virgo A, Cyg-A を再度観測して精較正結果の確認を行った。この2回目と3回目の観測で得られた精較正結果を第4表に示す。2回目と3回目の結果はほぼ一致し再現性が確認された。また同表には過去の較正結果も示している。4. で述べた開口効率と同じく経年変化が認められる。これは鏡面の経年変化や地盤の変化等に起因するものと思われるがいずれにしろ精密な電波源の追尾を行うためには数年に1回再較正が必要であると思われる。

第4表 26mアンテナの軸較正結果

観測日	1984年	1984年	1979年 ⁽⁹⁾	1973年 ⁽¹⁰⁾
較正パラメータ	2月14, 15日	1月12, 13日	4月25日~5月3日	5月
χ	0.00265°	0.00366°	0.0015°	0.0029°
ω	0.00966°	0.0120°	-0.0083°	-0.0002°
g	0.000470°	0.000460°	-0.0005°	0.00042°
ε	-0.00396°	-0.0140°	0.0506°	-0.0025°
δ	0.0216°	0.0260°	-0.0379°	0.0029°
ΔAz_0	0.0361°	0.0298°	-0.0191°	—
ΔEl_0	0.0405°	0.0334°	-0.0039°	—

6. おわりに

26 m アンテナは日米共同の大陸間 VLBI 実験において重要な役割の1つを今後5年間以上果たすことになった。このため受信周波数を4 GHz 帯から2/8 GHz 帯の

2周波数帯に改造した。改造に伴う開口効率の変化は、それがVLBIの遅延決定精度を左右する重要なパラメータのうちの一つであることから数多くの電波源を観測して精密に実測を行った。その結果2/8 GHz帯の両周波数帯とも50%以上の開口効率を持つことが分った。また遅延決定精度劣化の要因としてアンテナ雑音温度があげられるが、これを小さく抑えるためには低損失、高効率の給電系を必要とする。特にこの特性に着目して製作された2/8 GHz帯給電系は予想をはるかに上回る良い特性のものが得られた。

またVLBI観測では電波星をビームの中心でとらえて精密に追尾し、電波星の放射電波を最大限有効に利用して相関処理を行わなければならない。そこで多数の電波星を長時間観測して精密な軸較正パラメータを求めた。その結果、2回にわたるシステムレベル実験において26 mアンテナ及び給電系は予想通りの性能を発揮することができた。

最後に、本システムの開発にあたって適切な御助言と暖かい御指導をいただきました佐分利義和元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実験実施センタ長に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 栗原, 村上; “26m アンテナ駆動, プログラム追尾”, 本特集号 II-3
- (2) 栗原, 川口; “遅延基準用標準受信装置”, 本特集号 II-10
- (3) 尾嶋, 高橋, 吉田, 佐藤, 玉川; “宇宙通信実験用 26mφ アンテナの電気的特性”, 電波季, 16, 87, 1970
- (4) 雨谷, 川口; “フロントエンド”, 本特集号 II-4
- (5) 木内, 黒岩; “バックエンド”, 本特集号 II-5
- (6) 今江, 木内; “システム遅延時間校正装置”, 本特集号 II-8
- (7) T. A. Clark et al., “Synchronization of Clocks by Very-Long-Baseline Interferometry”, IEEE trans., vol IM-28, No. 3, September 1979
- (8) 川口, 吉野, 竹内; “電波星を用いた主局アンテナ特性の測定”, 電波季, 27, 143, 1981
- (9) 高橋富士信, 河野宣之, 小池国正; “経緯儀式大口径アンテナの軸較正”, 電波季, 26, 137, 1980
- (10) N. Kawano, M. Inoue, Pointing Accuracy and Electrical Performance of Kashima 26mφ Antenna, obtained from Radio Astromical Observations, J. Radio Res. Labs. vol 21, No. 107, 1974

