

2004年度
VERA ステータスレポート

国立天文台 V E R A 観測所

第 1.1 版 2004 年 11 月 10 日

目次

1	2003年度からのシステム更新状況	4
1.1	アンテナ	4
1.2	受信機	4
1.3	相関器	4
1.4	局位置	4
1.5	局運用	4
2	システム	5
2.1	アレイ	5
2.2	アンテナ	7
2.2.1	基本設計	7
2.2.2	駆動系	7
2.2.3	開口能率	7
2.2.4	能率の仰角依存性	8
2.2.5	能率の離角依存性	8
2.2.6	ビームパターン、ビームサイズ	9
2.2.7	指向精度(ポインティング)	12
2.3	受信機	15
2.4	周波数変換部	15
2.5	デジタル信号処理部	16
2.6	データ記録系	16
2.7	相関処理	16
2.8	各種較正	18
2.8.1	時刻較正、バンドパス較正	18
2.8.2	温度較正	18
2.8.3	位相較正	18
2.9	測地	19
2.9.1	測地観測の観測周波数帯域	19
2.9.2	観測モード、バックエンド装置	19
2.9.3	局位置の決定方法、精度	19
2.9.4	GPS とのコロケーション	20
2.9.5	プレート運動など	20
2.9.6	地球回転パラメータ	20
2.10	総合的な位置天文精度	21
3	観測提案に際して	22
3.1	観測可能なモード	22
3.2	観測提案者に要求される条件	22
3.3	観測天体に関する制限	22
3.4	分解能	22

3.5	感度	23
3.6	システム雑音温度	23
3.7	位置天文観測	24
3.8	観測天体に関する情報	24
3.9	野辺山 45m、鹿島 34m の参加について	25
3.10	観測データの公開について	25
4	観測の実行とデータ解析	27
4.1	観測の準備	27
4.2	観測、相関処理	27
4.3	データ解析	27

はじめに

2004年度はVERAの第二期試験的共同利用観測を行います。残念ながら試験観測の結果として、アストロメトリ観測に成功しているとは言えない状況であり、昨年度と同様に今年度も試験的な共同利用観測を継続することになりました。昨年からのプロジェクトの進捗としては、受信機の初段LNAの性能を向上させ、安定化しました。さらに運用系において、水沢から4局の遠隔観測が可能になりました。これによって観測時間を大幅に増やすことができ、この1年間に100日を超す観測を行ってきました。またフィドームの改修も進めています。さらに1Gbps系の記録・再生システムを安定化することが出来ており、観測の主要な記録モードは1Gbps系に移行しており、観測感度の向上を行っています。プロジェクトとしては、アストロメトリ観測の結果を出すべく各種補正ルーチンの作成・試験を行っており、なるべく早期に科学的な成果を出すことがもっとも重要なことであると認識して進めています。さらに次年度以降早期に共同利用観測を本格化し、外国にもオープンすることを目指しております。本共同利用観測によって、日本による独自の科学的な成果を出すことのできる魅力的な研究テーマが提案されることを希望しています。今後ともご理解とご協力をお願いします。

VERA 観測所長
小林 秀行

1 2003年度からのシステム更新状況

1.1 アンテナ

水沢局にて、フィードロスを低減させるためにフィードーム交換が行われた。この結果、フィードームによる損失が22GHz帯で0.4dBから0.3dBに、43GHz帯で1.3dBから0.7dBに減少した（今年度中に損失低減のため再改修予定。残りの3局についても来年度のメンテナンス時の同様のフィードームへ交換予定）。

また、能率、ポインティング性能などが最新の値に更新された。

1.2 受信機

43GHz帯受信機の低雑音化の一環として初段アンプモジュールが交換され、受信機雑音温度が約80Kまで改善した（交換前は約120～200K）。また、他局に比べて位相安定度の低かった小笠原局の局部発信機が交換され、他局と同等の安定度が達成された。

1.3 相関器

DIR2000系処理時の時刻同期不具合が改修され、またレコーダー再生時の時刻符号検出ルーチンが強化され、定常的な相関処理が可能になった。

1.4 局位置

水沢局については国土地理院との月1回程度のVLBI観測により、他の3局は継続的なGPS観測により座標が求められている。また、新たに変位速度も与えられている。

1.5 局運用

網運用ソフトが整備され、水沢にあるAOC(Array Operation Center)からの自動運用が可能になった。2004年9月以降の観測は、AOCからの遠隔制御で行われている。

2 システム

2.1 アレイ

VERA のアレイは、水沢、入来、小笠原および石垣島の4つの観測局からなる。VERA の観測局の位置を表1にまとめる。全6基線のうち、最短基線は入来 - 石垣島間の1019km、最長基線は水沢 - 石垣島間の2270kmである。全4局で観測した際に得られるUVカバレッジの例を図1に示す。また、最長基線長から期待される最高分解能はK帯(22GHz)で約1.2 mas、Q帯(43GHz)で約0.6 masである。

表 1: VERA 観測局位置と変位速度

局名	東経 (° ' ")	北緯 (° ' ")	楕円体高 (m)	標高 (m)
水沢	141 07 57.199	39 08 00.726	116.5	75.7
入来	130 26 23.593	31 44 52.437	573.6	541.6
小笠原	142 12 59.809	27 05 30.487	273.2	223.0
石垣島	124 10 15.578	24 24 43.834	65.1	38.5

局名	X (m)	Y (m)	Z (m)	IVS2 ^a	IVS8 ^b	CDP ^c
水沢	-3857241.8697	3108784.8138	4003900.6170	Vm	VERAMZSW	7362
入来	-3521719.5672	4132174.7531	3336994.3272	Vr	VERAIRIK	7364
小笠原	-4491068.9393	3481544.8225	2887399.6162	Vo	VERAOGSW	7363
石垣島	-3263994.6495	4808056.3525	2619949.3897	Vs	VERAISGK	7365

a: IVS 2文字コード b: IVS 8文字コード

c: CDP(NASA Crustal Dynamics Project) コード

局名	X (m/yr)	Y (m/yr)	Z (m/yr)
水沢	0.0041	0.0047	-0.0031
入来	-0.0263	-0.0084	-0.0193
小笠原	0.0234	0.0317	0.0137
石垣島	-0.0431	0.0036	-0.0495

座標値はすべて2003.0年元期。座標値・速度の決定方法、並びに精度については、2.9 測地の項を参照のこと。

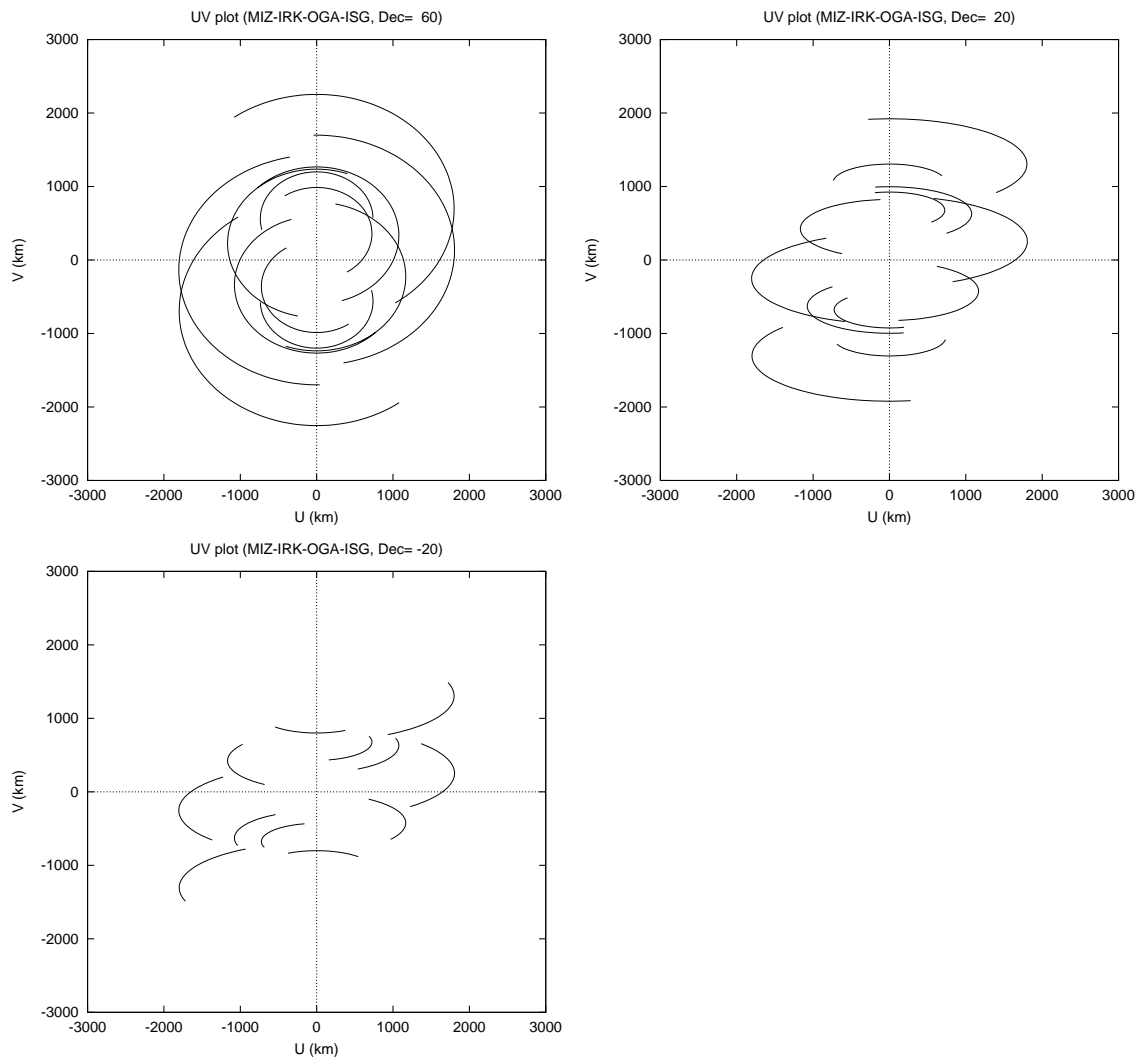


図 1: VERA4 局で観測した時の UV カバレッジ (± 3000 km)。全局とも EL20 度以上で観測したとして計算。左上、右上、左下の順に、それぞれ天体の赤緯 60° 、 20° 、 -20° 。

2.2 アンテナ

2.2.1 基本設計

VERA のアンテナは 4 局とも同一設計であり、主鏡部は開口直径 20m、焦点距離 6m、副鏡は直径 2.6m で、焦点はカセグレン焦点、マウントは AZ-EL 方式である。カセグレン焦点部には 2 ビーム受信機構が設置されており、2 つの天体を同時に観測することができる。2 ビーム観測用の受信機は駆動可能な 2 つのプラットフォーム上にそれぞれ設置されており、2 天体の離角を $0.32^\circ \sim 2.2^\circ$ の間で自由に設定可能で、視野回転機構 (Field Rotater、FR) により 2 ビーム受信部全体が回転することで 2 天体同時追尾を行う。

また、単一ビーム観測の際には、2 ビーム受信機のうちどちらか一つをアンテナ光軸上 (離角オフセット 0 度) に設置して観測することが可能である。

2.2.2 駆動系

アンテナの駆動性能について、駆動速度、加速度、追尾可能範囲等を表 2 にまとめる。

表 2: VERA アンテナ駆動性能

駆動軸	追尾可能範囲	最大駆動速度	最大駆動加速度
AZ*	$-90^\circ \sim 450^\circ$	$2.1^\circ/\text{sec}$	$2.1^\circ/\text{sec}^2$
EL	$5^\circ \sim 85^\circ$	$2.1^\circ/\text{sec}$	$2.1^\circ/\text{sec}^2$
FR*	$-270^\circ \sim 270^\circ$	$3.1^\circ/\text{sec}$	$3.1^\circ/\text{sec}^2$

* AZ 角は北が 0° 、東が 90° 。FR 角は、ビーム 1 が天側、ビーム 2 が地側に来るときが 0° で、天体からアンテナを見たときに時計回り方向が正。

2.2.3 開口能率

2004 年度冬季 (1 月から 4 月) に VERA 各局のアンテナを用いて木星の 5 点スキャンを行い、木星の連続波観測による VERA の 20m アンテナの開口能率測定を行った。測定では、常温ダミー (R-Sky) による温度較正を行い、アンテナ温度 T_a^* を求め、木星の輝度温度を K、Q バンドともに 160 K^1 を仮定して開口能率を計算した。結果については、表 3 にまとめた。

2003 年 10 月から 2004 年 4 月までの間に、副鏡調整、2 ビーム駆動装置などの再設定は行っていない。ただし、水沢局ではフィドーム交換を行っている。2003 年 10 月のステータスレポート報告値と比べると、入来局では 2004 年冬季測定値の方が有意

¹2003 年 10 月のステータスレポートでは、Q バンドは 170 K を仮定していた。

に小さく、また、石垣島局では2004年冬季測定値の方が有意に大きくなっている。この2局については、2004年冬季に2回の測定を行ってどちらも再現性が確認されている。2003年10月のステータスレポート報告値と2004年冬季測定値の違いは、温度の較正方法やデータ取得方法の違い、指向誤差による見かけ上の能率低下が原因と考えられる。

表 3: Aperture efficiency of the VERA 20m antenna

Site	Band	Date	η_A (%)	HPBW (arcsec)	EL (deg)	Num. of Scan	θ_s^a (arcsec)
MIZ	K	Apr 21 2004	52.1±1.1	150.1±5.5	54-58	4	39.9
MIZ	Q	Apr 21 2004	47.2±5.6	85.1±1.4	59-60	2	39.9
IRK	K	Apr 25 2004	47.4±5.6	151.3±10.3	49-57	7	39.6
IRK	Q	Apr 25 2004	40.8±2.1	80.4±3.6	60-66	8	39.6
OGA	K	Nov.2002/Feb.2003	44.8±3.8	150 ^b	67-71	4	40.4/45.4
OGA	Q	Jan 28 2004	40.3±7.6	73.0±7.0	63-65	3	41.2
ISG	K	Apr 28 2004	49.5±2.3	152.6±6.9	63-75	17	39.3
ISG	Q	Apr 28 2004	49.3±2.6	78.2±3.5	74-54	18	39.3

a: Source size for Jupiter

b: Assumed value

2.2.4 能率の仰角依存性

メーザー源の5点スキャンを仰角を変えながら行い、VERA アンテナの開口能率の仰角依存性について測定を行った。能率の仰角依存性は、入来、小笠原、石垣島局のKバンドでのみ測定が成功している。測定結果の例については、図2にまとめた。石垣島局だけでなく、全局で低仰角(EL<20度)になると能率が顕著に下がり始めていることが確認されている。この能率の仰角依存性については、データ解析時に補正をすることができるように、AIPSで読み込ませることが可能なゲインカーブテーブル(GCテーブル)としてFITSファイルに付加される。

2.2.5 能率の離角依存性

メーザー源の5点スキャンを2ビームの離角を変えながら行い、VERA アンテナの開口能率の離角依存性について測定を行った。2003年10月のステータスレポート以降では、入来局におけるK、Qバンドの新規測定、石垣島局におけるK、Qバンド再測定を行っている。水沢局、小笠原局では測定を行っていない。測定結果の例については、図3にまとめた。能率の仰角依存性と同様に、離角依存性についても、データ解析時に補正をすることができるように、AIPSで読み込ませることが可

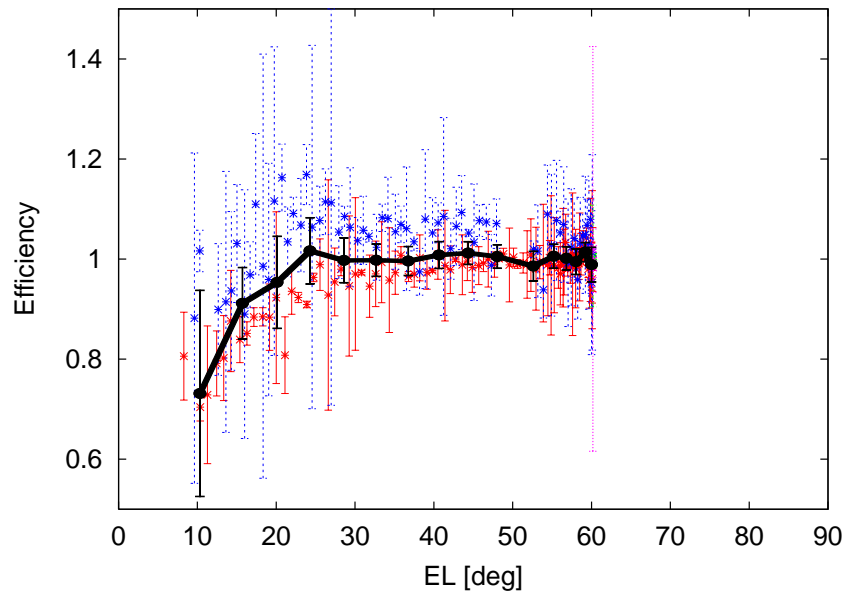


図 2: 石垣島局アンテナの 22GHz における能率の仰角依存性。能率の基準データは EL=50 度での測定値。赤、青は 2 回の独立な観測の結果。黒線は観測データを 10 点ごとに平均化してスムージングしたデータ (フィッティングの結果ではない)。

能なゲインカーブテーブル (GC テーブル) として FITS ファイルに付加される。

2.2.6 ビームパターン、ビームサイズ

VERA20 m アンテナの K バンドでのビームパターンの例を図 4 に示す。サイドローブレベルは、小笠原局の 2.0 度離角でのビームパターンで -10 dB という高い値が確認されているが、その他は概ね -15 dB 程度となっている。また、サイドローブには非対称な構造が見られるものの、メインビームの形は離角によらず対称的なガウシアンになっている。表 4 に、ポインティング観測時の十字スキャンで得られたビームサイズ (HPBW) を K、Q バンドともまとめる。この測定でもビームサイズは離角に依存せず、ほぼ一定値となっている。

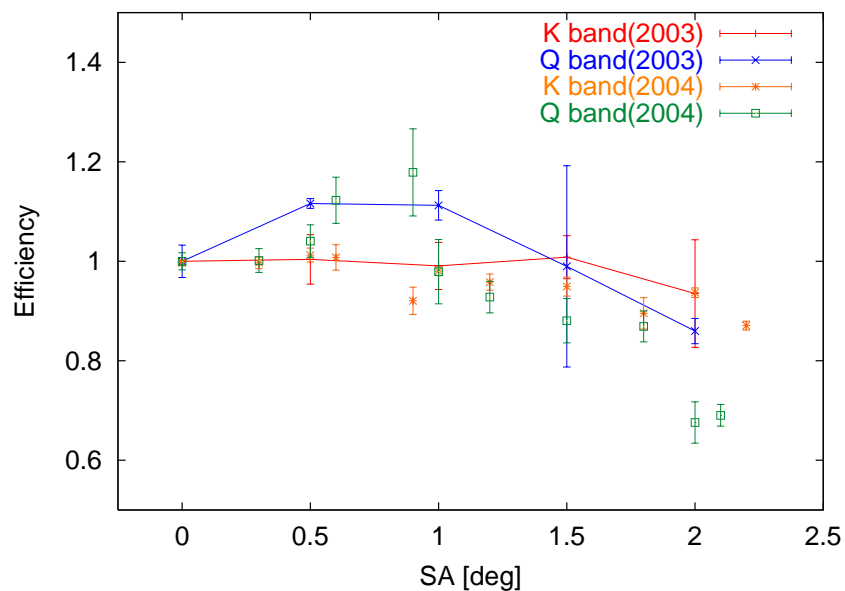


図 3: 石垣島局アンテナにおける能率の離角依存性。能率の基準データは離角=0 度での測定値。

表 4: アンテナのポインティング観測で得られたビームサイズ

局名	帯域	HPBW[AZ]	HPBW[EL]	データ数
		(arcsec)	(arcsec)	
水沢	K	148.14±8.36	146.65±9.01	478
入来	K	148.10±12.66	148.33±12.64	840
小笠原	K	152.87±9.24	152.38±9.28	1725
石垣島	K	153.09±11.53	153.70±12.23	871
水沢	Q	74.48±7.66	70.09±9.55	183
入来	Q	78.41±7.40	77.02±7.52	562
小笠原	Q	77.72±7.05	76.79±7.53	312
石垣島	Q	78.77±8.32	77.08±8.47	246

誤差は標準偏差 (1 σ)

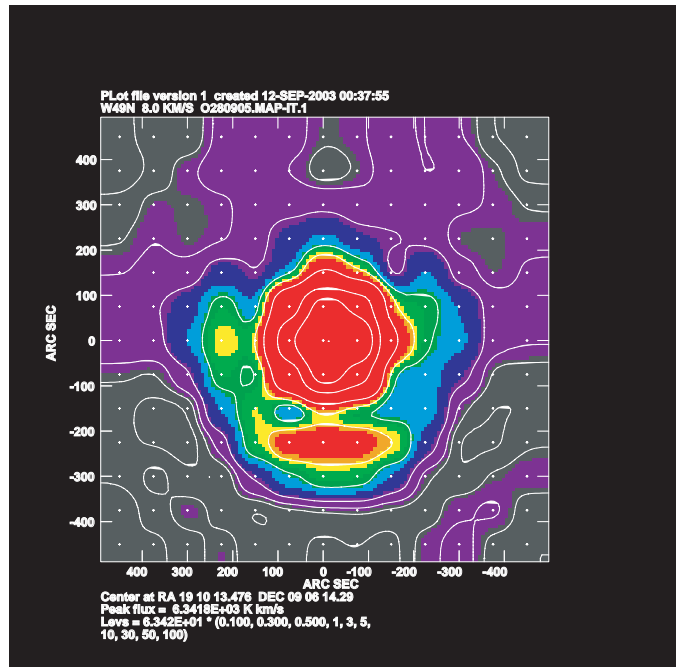
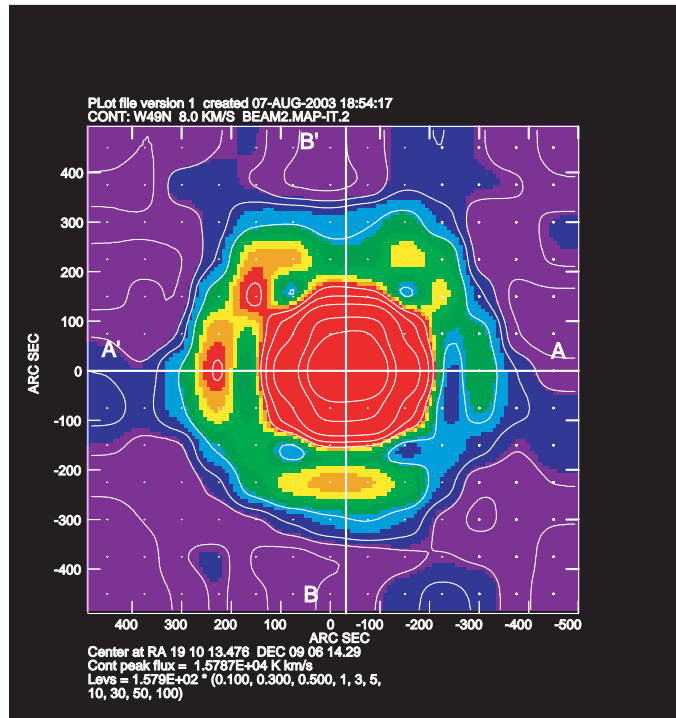


図 4: 入来局、K バンド受信機 A、離角 0.0 度のビームパターン（上）と、小笠原局、K バンド受信機 A、離角 2.0 度のビームパターン（下）。いずれも、W49N の水メーターを 75° 角グリッドでマッピング。

2.2.7 指向精度（ポインティング）

VERA の 20m アンテナは、メンテナンス時にプロジェクト内の担当者により、指向精度確認のポインティング観測とアンテナ器差補正が行われている。強度が強かつ位置が正確（～数秒角の精度）なメーザー源を AZ、EL 3 点ずつの十字スキャンで観測し、全方位でのポインティングオフセットの測定を行う。測定されたポインティングオフセットを

$$\begin{aligned} \delta Az = & A_1 \sin(Az) \sin(El) - A_2 \cos(Az) \sin(El) + A_3 \sin(El) + A_4 \cos(El) + A_5 + \\ & A_9 \sin(2Az) \sin(El) - A_{10} \cos(2Az) \sin(El) + \\ & A_{11} \sin(2Az) \cos(El) + A_{12} \cos(2Az) \cos(El) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta El = & A_1 \cos(Az) + A_2 \sin(Az) + A_6 + A_7 \cos(El) + A_8 \sin(El) + \\ & A_9 \cos(2Az) + A_{10} \sin(2Az) + \\ & A_{13} \left[\frac{El - 40}{30} \right] + A_{14} \left[\frac{El - 40}{30} \right]^2 \end{aligned} \quad (2)$$

のモデルによってフィッティングして器差パラメータを決定し、指向精度を向上させている。ここで、 A_1 - A_8 は標準的な経緯台方式の望遠鏡の器差パラメータ、 A_9 - A_{12} はポインティングオフセットに対して $2AZ$ の周期性を持つ高次の項、 A_{13} - A_{14} は重力変形に対して三角関数よりパラメータの分離度が高く、かつ低仰角でのポインティングオフセットの発散をもフィッティングできる多項式の経験的な項である。VERA では A_1 - A_{12} の 12 パラメータ、または A_1 - A_6 と A_9 - A_{14} の 12 パラメータで器差補正を行うことが可能である。

2003 年 10 月のステータスレポート以降、2004 年 5 月に全局で 22 GHz 帯の簡単なポインティング観測を行い、 A_1 - A_8 の 8 パラメータから A_1 - A_6 と A_9 - A_{14} の 12 パラメータに更新されている。また、入来局では、2004 年 8 月にも再測定を行い、器差パラメータを更新している。このときの器差補正後の指向精度は表 5 にまとめた。また、器差補正後のポインティングオフセットの例は、図 5 にまとめた。指向精度は 2003 年 10 月のステータスレポート報告値に比べて大きくは変わってない。ただし、2004 年 5 月の測定データでは、低仰角 ($EL < 20$ 度) 以下でポインティングオフセットが大きく発散し、器差補正後も系統的なオフセットが残るという傾向が確認されている。これは、冬季に比べて観測条件の悪い時期にポインティング観測を行った影響と考えられる。

VERA の 20 m アンテナでは、離角が 0 度以外で観測を行う場合には図 6 のように FR 角に対して三角関数的なふるまいをするオフセットが最大で 15" 程度生じることが、2003 年 10 月のステータスレポートでも報告されている。これは、検討の結果、2 ビーム駆動機構が計算値よりも離角が開きすぎるためと確認されており、現在対応策が議論されている。

表 5: VERA 20m アンテナの指向精度

Site	Band	Date	σ^a (arcsec)	σ_{AZ}^b (arcsec)	σ_{EL}^c (arcsec)
MIZ	K	May.2004	7.240	6.166	8.174
IRI	K	May.2004	12.783	9.691	15.260
OGA	K	May.2004	12.920	7.058	16.853
ISI	K	May.2004	9.228	7.866	10.414

a: Standard deviation.

b: Standard deviation for AZ.

c: Standard deviation for EL.

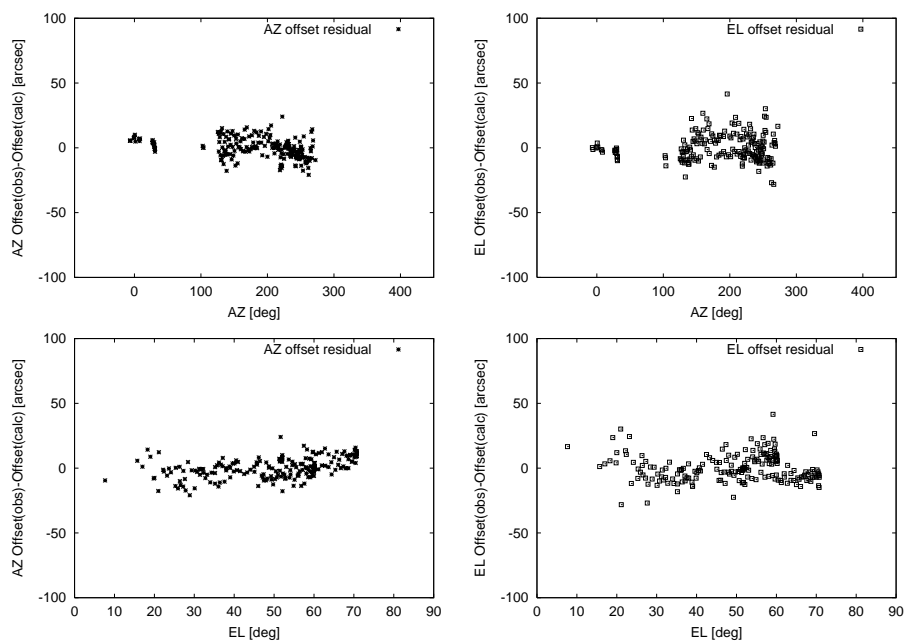


図 5: 石垣島局の器差補正後のポインティングオフセット残差。上段左右の図はそれぞれ AZ 角に対する AZ、EL 角残差、下段左右の図はそれぞれは EL 角に対する AZ、EL 角残差。

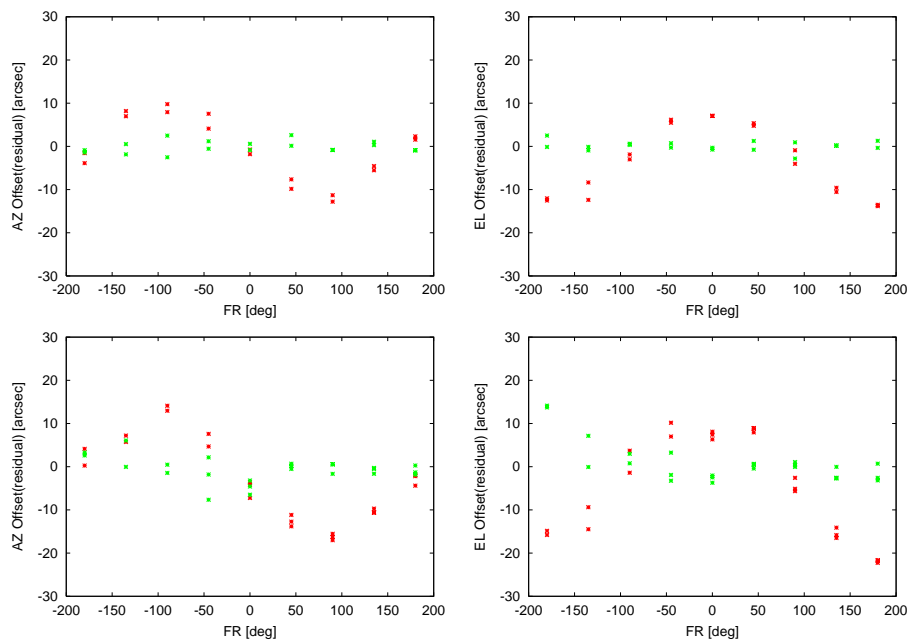


図 6: 入来局 K バンド受信機 A のポインティングオフセットの離角依存性。赤の点が離角オフセットがある時の追尾誤差で、緑は基準となる離角オフセット角 0 度の追尾誤差を示す。(上) 離角 1.0 度 (W30H で観測), (下) 離角 2.0 度 (W49N で観測)。それぞれ左が AZ 角、右が EL 角。

2.3 受信機

VERA の各アンテナには4バンド (S、X、K、Q) の受信機が搭載されていて、このうち K (22GHz 帯)、Q (43GHz 帯) が VERA の主観測帯域であり、両帯域とも2ビーム同時観測が可能である (K、Q 混合の同時観測は不可)。S/X (2GHz 帯、8GHz 帯) は測地観測用として各局に1式ずつ配備されており、共同利用では公開されない。表6にK帯、Q帯の受信機性能についてまとめる。

表 6: VERA 受信機性能

帯域	受信可能周波数帯	受信機雑音温度	受信偏波
K	21.5 - 23.8 GHz	30 ~ 50 K	左旋円偏波
Q	42.5 - 44.5 GHz	70 ~ 90 K	左旋円偏波

2.4 周波数変換部

受信機で増幅された信号は第1局部発信機から出る基準信号と混ぜ合わされることにより、4.7GHz ~ 7GHz の中間周波数帯域 (Intermediate Frequency、IF) へと変換される。この第1局部発信機は周波数固定であり、Kバンドでは16.8GHz、Qバンドでは37.5GHzである。IFは各ビームごとに1チャンネルずつある。IF出力は、ベースバンド変換部シンセサイザーからの基準信号と混ぜ合わされてベースバンド周波数 (0-512MHz) に変換される。このシンセサイザーは2ビーム間で共通であり、周波数は4GHz ~ 7GHzの間で可変である。地球回転によるドップラー効果を補正する周波数追尾は観測後相関処理時に行われ、観測中はベースバンドシンセサイザーの周波数は一定値に保たれる。図7に周波数変換部の概念図をまとめる。

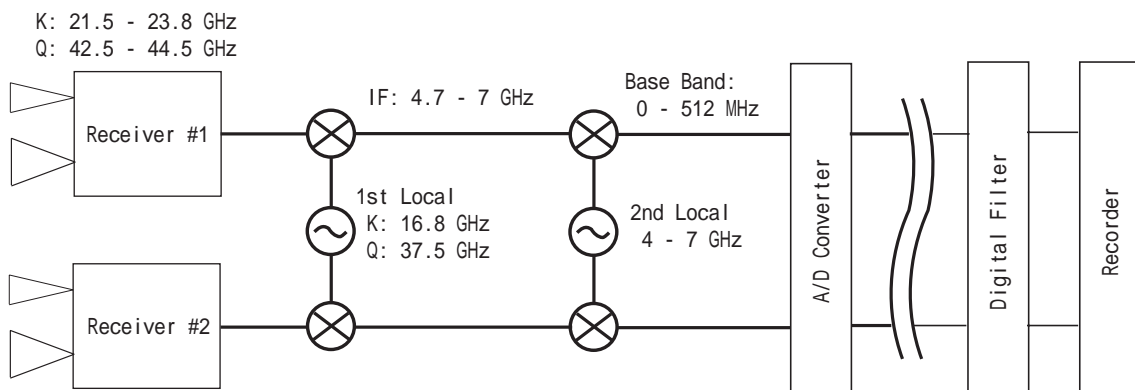


図 7: VERA の周波数変換部の概念図

2.5 デジタル信号処理部

ベースバンド出力 (0 ~ 512MHz x 2 beam) はアンテナ上部機器室内に設置された A/D 変換器によってデジタル化され、光ファイバーを通じて各局観測棟のデジタル信号処理装置に転送される。デジタル化の際の量子化ビット数は 2 ビット、帯域幅は 512MHz であり、各ビームあたり 2048Mbps (Mega bit per second) のレートで信号が伝送される。

一方、後述するように記録系の最大レートは 2 ビーム合わせて 1024Mbps であるので、A/D 変換器によって量子化された信号をフィルタリングして必要な周波数帯のみを切り出して記録する必要がある。この帯域の切り出しはデジタルフィルターによって行われ、比較的自由にチャンネル (CH) 数や帯域幅を設定できる。今回の試験的共同利用で使用可能なモードは、表 7 に示す 3 モードである。

2.6 データ記録系

データ記録系には 2 種類のレコーダーが存在し、VSOP 用に開発され J-Net でも使われてきた DIR1000M (記録速度 128Mbps) と、VERA 用に新たに開発された DIR2000 (記録速度 1024Mbps) が使用可能である。ともに 2 ビットサンプリングで記録されるので、記録可能な総帯域幅は DIR1000 系が 32MHz、DIR2000 系が 256MHz である。テープ 1 巻あたりの記録時間は DIR1000 系では 2 時間であり、DIR2000 系では 80 分である。なお、デジタルフィルターの観測モードによっては (VERA7、VERA10 等)、DIR1000 系と DIR2000 系に同時記録することも可能である。

2.7 相関処理

相関処理は、国立天文台三鷹キャンパスにある FX 相関器で行われる。同時に相関処理できる最大局数は、DIR2000 系記録の場合 5 局、DIR1000 系記録の場合 10 局であり、VERA4 局の DIR2000 系記録、あるいは VERA + 野辺山 45m + 鹿島 34m の DIR1000 系記録のどちらの観測モードも 1 回の相関処理で相関可能である。ただし、DIR1000 系と 2000 系の混合相関はできない。データ出力時の 1 局あたりの最大分光点数は、DIR1000 系の場合全チャンネル合計で 1024 点、DIR2000 系の場合 2 ビームの全チャンネル合計で 2048 点である。また、相関器出力の時間分解能は通常 1 秒程度に設定されるが、最大 25 ミリ秒までの高い時間分解能も可能である (但し相関器出力データ量が膨大になる)。

表 7: VERA デジタルフィルタモード

モード名	レート	総 CH 数	各 CH 帯域幅	CH 番号	ビーム	帯域
VERA1	1024Mbps	2	128 MHz	1	A	256 - 384 MHz
				2	B	256 - 384 MHz
VERA7	1024Mbps	16	16 MHz	1	A	256 - 272 MHz
				2	B	128 - 144 MHz
				3	B	144 - 160 MHz
				4	B	160 - 176 MHz
				5	B	176 - 192 MHz
				6	B	192 - 208 MHz
				7	B	208 - 224 MHz
				8	B	224 - 240 MHz
				9	B	240 - 256 MHz
				10	B	256 - 272 MHz
				11	B	272 - 288 MHz
				12	B	288 - 304 MHz
				13	B	304 - 320 MHz
				14	B	320 - 336 MHz
				15	B	336 - 352 MHz
				16	B	352 - 368 MHz
VERA10	1024Mbps	16	16 MHz	1	A	256 - 272 MHz
				2	B	256 - 272 MHz
				3	A	272 - 288 MHz
				4	B	272 - 288 MHz
				5	A	288 - 304 MHz
				6	B	288 - 304 MHz
				7	A	304 - 320 MHz
				8	B	304 - 320 MHz
				9	A	320 - 336 MHz
				10	B	320 - 336 MHz
				11	A	336 - 352 MHz
				12	B	336 - 352 MHz
				13	A	352 - 368 MHz
				14	B	352 - 368 MHz
				15	A	368 - 384 MHz
				16	B	368 - 384 MHz

VERA7、10 に関しては任意の 2CH を DIR1000 系に同時記録可能。

2.8 各種較正

2.8.1 時刻較正、バンドパス較正

各局の時刻同期は、周波数標準装置と GPS との時刻比較により 0.1 マイクロ秒の精度で得られている。この精度以下の時刻オフセット較正やクロックレート（時刻オフセットの時間変化率）較正は、観測中に少なくとも 1 回、位置が正確に知られている明るい連続波源を観測することで行われる（通常 60 分～90 分毎の観測が推奨される）。また、システムの周波数特性の較正（バンドパス較正）も明るい連続波源の観測によって行われる。

2.8.2 温度較正

VERA の各局各ビームには常温ダミーのチョッパーホイールが搭載されており、各スキャンが始まる前に R-Sky 法によるシステム雑音温度計測が可能である。さらに、天体観測中はスカイレベルを常にモニターしているので、スキャン前後の常温ダミーのレベルを内挿してやることにより、常時システム雑音を得ることができる。

2.8.3 位相較正

2 ビーム間で発生する機械的位相差（光路長差）を補正するために、2 ビーム観測中は主鏡面上に搭載された較正雑音源が点灯され、2 ビーム間での位相が常時モニターされる。現在、位相較正精度は 22GHz 帯で位相角 10 度以下であると推定されており、最終的な確認作業が進行中である。なお、雑音源の点灯によりシステム雑音温度は 22GHz 帯で 7K 程度、43GHz 帯で 15K 程度増加する。

2.9 測地

基線長を決める測地観測は VERA のプロジェクト観測として行われ、その最新の結果が相関処理の際に利用される。VERA 局間の相対的な基線長決定は VERA の 4 局で閉じた観測として行われ、国際座標系との結合は、国土地理院の測地観測に水沢局が参加することで行われる。測地システムの詳細は以下の通りである。

2.9.1 測地観測の観測周波数帯域

測地観測は S/X 帯 (2GHz/8GHz) で行われ、その周波数帯域は S 帯が 2210 ~ 2330 MHz、X 帯が 8180 ~ 8600 MHz である。水沢局においては、S 帯について周波数を上方に移動した観測 (2230 ~ 2260MHz) に対応するために、2210 ~ 2370 MHz の帯域を持つ。

2.9.2 観測モード、バックエンド装置

水沢局のみ K4 バックエンドを有し、主として国土地理院との測地観測、国内互換観測に使用される。その主な性能は、帯域幅 4MHz、量子化ビット数 1bit、16 チャンネル (トータル 128Mbps 記録) であり、チャンネル割り当ては、S 帯 6ch (または 8ch)、X 帯 8ch となっている。また、水沢局には今年度 (2004 年度) 中に K5 VSSP システムが導入される。国土地理院との測地観測は K5 システムに移行していく計画である。

VERA 網内の測地観測では、VERA 用のデジタルデータ処理システムを用いて行われる。その主な性能としては、帯域幅 16MHz、量子化ビット数 2bit、16 チャンネル (トータル 1024Mbps 記録) であり、S 帯 4ch、X 帯 12ch とした S/X 帯での観測および、K 帯 16ch (32MHz 間隔で 16ch すべて K 帯) での観測も可能である。また、RISE 観測用に RISE/SELENE 専用ターミナルが RISE グループにより準備されており、今年度中に VERA 各局に配備される予定である。

2.9.3 局位置の決定方法、精度

表 1 にあげた水沢局の位置・速度は、国土地理院による VLBI のグローバル解析による値である。ITRF2000 による値 (元期 1997 年) が求められているが、変位速度を加えて元期を 2003 年に合わせている。3 次元の各座標の推定精度は 5mm ~ 6mm となっている。ITRF 系との結合精度の目標を 10mm としているが、推定誤差のマーヅンを 2 倍程度とみてもほぼ目標精度に達するものと思われる。速度の決定については、1993 年から行われている水沢 10m アンテナによる VLBI 観測のデータも取りこまれている。現在、国土地理院と水沢局間の測地観測を月 1 回程度の頻

度で実施しており、座標系の維持がはかられる。

一方、入来局、小笠原局、石垣島局では GPS により座標と速度が求められている。水沢局における VLBI と GPS の比較から、入来局、小笠原局、石垣島局では、30mm ~ 40mm の精度で座標値が得られているものと推定される。VERA 網内の測地 VLBI 観測は 2004 年 11 月から開始されており、まもなく VLBI 自身による位置決定が行われる。

なお表 1 では、種々の比較のために有効精度以上の 0.1mm の桁まで表示している。

2.9.4 GPS とのコロケーション

VERA 各局では GPS の連続観測を行っている。30 秒サンプリングを行っているが、技術的には離島局も含め 1 秒サンプリングも可能である。観測データは水沢局にネットワーク経由で収集している。各局とも水素メーザ、ないし、セシウム原子時計による外部 5MHz ないし 10MHz の基準信号を使用している。GPS アンテナの位置は、データの蓄積により mm 台の精度が出ていると思われるが、庁舎内での局所的な座標結合の精度（特に上下位置関係）が悪く、入来局、小笠原局、石垣島局の座標精度は前節で述べた程度と見積もっている。

2.9.5 プレート運動など

プレート運動の速度は、最大 70mm / 年 に達する。また、地震によるステップ的な変位もある。たとえば 2003 年 5 月 26 日の宮城沖地震では水沢局は 15 ~ 20mm の変位が生じている。座標の精度として 1mm ~ 10mm の精度が必要な場合は、これらの変位を適切に取り扱う必要がある。また、GPS の観測からは座標値の年周変動などが見られるが、これらはまだモデル化されていない。VLBI の観測データが蓄積されれば、これらの変動もモデル化することになる。

2.9.6 地球回転パラメータ

VERA では、地球回転パラメータ (X 、 Y 、 $\Delta UT1$ 、 $\Delta\phi$ 、 $\Delta\varepsilon$) をルーチン的には決定しない。IERS 中央局から提供される地球回転パラメータを、既知のデータとして解析に用いる。なお、IERS Bulletin A の Daily の解の精度は、 X 、 Y で 0.1mas 程度、 $UT1$ で 0.02ms 程度、10 日先の予測値で X 、 Y は 3.0mas 程度、 $UT1$ で 1.6 ms 秒程度である。

2.10 総合的な位置天文精度

これまでの試験観測の結果から、現在 VERA の 2 ビーム観測時の位置天文精度は 0.3 mas 程度と期待される。しかし、2 天体の離角が大きい場合や高度が低い場合など、観測条件が悪い場合には精度は劣化する。現在の位置天文精度を決めている要因として、幾何学的遅延追尾の誤差と、天頂湿潤大気遅延予測誤差の 2 つが大きな要因として挙げられる。幾何学的遅延追尾誤差については、相関処理時の大まかな遅延予測値をより精密な遅延追尾計算値で補正するツールがリリースされる予定であり、DIR2000 系記録の観測では相関処理後の補正が可能になる。一方、天頂湿潤大気遅延に関しては予測が難しく、特に夏場は大きな位相誤差および位置誤差を発生させる。これらの問題を回避するためには、2 ビーム離角が小さく、かつ高度が高い天体ペアの観測が推奨される。

3 観測提案に際して

3.1 観測可能なモード

今回の試験的共同利用において公開される周波数帯は、昨年度と同じく K バンド (22GHz 帯) であり、昨年引き続き 2 ビームモードも公開される。また、VERA4 局に、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45m 望遠鏡および情報通信研究機構鹿島 34m 望遠鏡を加えた全 6 局の観測モードも公開される (ただし、野辺山 45m および鹿島 34m は単一ビームモードのみである)。

3.2 観測提案者に要求される条件

2004 年度の共同利用は、2003 年度に引き続き、観測可能なモードに制限の付いた試験的共同利用という位置付けにある。現在 VERA のシステムは立上げ段階にあり、観測提案者は装置や解析ソフト等に関するトラブルについて、VERA グループと共にリスクを負うことを要求される。このため、観測提案を行うことができる主観測提案者 (PI) は、国内研究機関に所属する研究者に限られる。さらに、観測提案者と VERA グループ間での問題認識やシステムへのフィードバックを円滑に行えるように、観測提案者は観測採択後、少なくとも 1 名の VERA グループメンバーを共同研究者として入れることを要求される。

3.3 観測天体に関する制限

以下は、VERA で現在進められているプロジェクト観測であり、このプロジェクトに含まれる観測天体については、今回の共同利用で観測することはできない。各プロジェクトで観測を予定している全天体のリストは、別途 VERA のホームページ上にて公開される。

- 銀河系中心の距離測定 (主担当者: 国立天文台 小林 秀行)
- 近傍ミラ型変光星の距離と周期光度関係 (主担当者: 鹿児島大学 面高 俊宏)
- オリオン-モノセロス領域巨大分子雲の距離と立体構造 (主担当者: 国立天文台 廣田 朋也)

3.4 分解能

基線長から期待される分解能は、 λ/D で見積もることができ、最長基線 2272km についてこれを適応すると、期待される分解能は K 帯 (22GHz) で約 1.2 mas、Q 帯 (43GHz) で約 0.6 mas である。実際の合成ビームの形は UV カバレッジに大きく影

響を受け、また、基線が UV 面上に投影されるために実際の分解能は上記の値より劣化する。

3.5 感度

ある天体を観測したときに各基線で期待される雑音レベル σ_{bl} は

$$\sigma_{bl} = \frac{2k}{\eta} \frac{\sqrt{T_{sys,1}T_{sys,2}}}{\sqrt{A_{e1}A_{e2}}\sqrt{2B\tau}}, \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 k はボルツマン定数、 η は量子化効率 (約 0.88)、 T_{sys} はシステム雑音温度、 A_e は能率込みのアンテナ有効開口面積、 B はバンド幅、 τ は積分時間である。積分時間 τ は条件にもよるが、大気揺らぎによるコヒーレンスロスのため通常 3 分程度、最も条件のいいときでも 5 分程度を超えると感度ロスが発生する (K バンドの場合)。冬場の晴天時程度の観測条件のもと VERA1 モードで連続波源を観測したとして、開口能率 ~50%、 $B = 128\text{MHz}$ 、 $\tau = 120\text{ sec}$ 、 $T_{sys} = 200\text{ K}$ を代入すると、 $\sigma_{bl} = 23\text{ mJy}$ となり、 $S/N = 7$ で検出できる最小フラックスは 160 mJy となる (VLBI 観測の場合、フリッジ検出に必要な S/N 比は最低で 5 程度、通常 7 以上が望まれる)。また、メーザーについては、上と同様の気象条件および積分時間で VERA7 モード (メーザー用チャンネル帯域 16MHz) で 512 点分光を行ったとすると、 $B = 31.25\text{ KHz}$ となり、 $\sigma_{bl} = 1.5\text{ Jy}$ 、 $S/N = 7$ での検出感度は 10.2 Jy となる。上と異なるパラメーターでの雑音レベルの推定は、以下の式を用いて行うことができる。

$$\sigma_{bl} = 23 \times \left(\frac{T_{sys,1}}{200\text{K}}\right)^{1/2} \left(\frac{T_{sys,2}}{200\text{K}}\right)^{1/2} \left(\frac{B}{128\text{MHz}}\right)^{-1/2} \left(\frac{\tau}{120\text{sec}}\right)^{-1/2} \text{ mJy}. \quad (4)$$

2 ビーム観測を行う場合、少なくともどちらか片方のビームは、上記の明るさ以上を持つ連続波源またはメーザー源を観測する必要がある。これより弱い天体を観測する場合には、明るい天体とペアにして 2 ビーム観測を行い、位相補償による長時間積分を行う必要がある。位相補償後の長時間積分については、参照天体が十分明るければ、積分時間 τ の平方根に比例して S/N が改善される。

3.6 システム雑音温度

図 8 に、水沢局の K バンドでの受信機雑音温度 (フィードム損失およびスピルオーバーの効果による雑音温度上昇を含む) および天頂でのシステム温度を示してある。図にあるように、冬場の晴天時で $T_{sys} = 150\text{ K}$ 、夏場の晴天時では $T_{sys} = 300\text{ K}$ が典型的な値である。他の局については、入来局では水沢局に似たシステム温度の季節変動を示すが、小笠原局や石垣島局では高温多湿の季節が長く、5 月 ~ 10 月は水

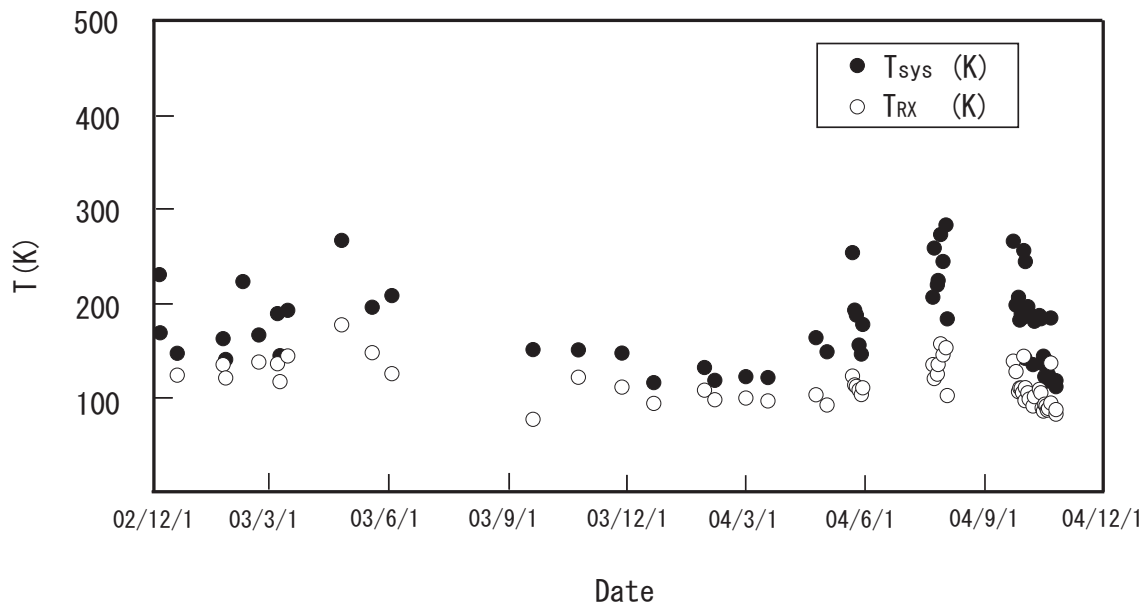


図 8: 水沢局における天頂でのシステム雑音温度 (2002 年 12 月 ~ 2004 年 10 月、雨天時を除く)。

沢の 7、8 月程度のシステム雑音となる日が多い。また、天頂大気吸収係数 (τ_0) も大きいので (夏場は典型的に $\tau_0 \sim 0.3$)、高度の低い天体では T_{sys} がさらに増加する。

3.7 位置天文観測

位置天文観測を行う場合は、DIR2000 系を用いた 2 ビーム観測が推奨される。これは、DIR2000 系の方が感度が高いことに加え、DIR2000 系データ用の遅延追尾補正ツールが近いうちにリリースされることによる。ただし、これらの問題が解決されても、天頂遅延大気遅延誤差などの問題も依然として存在しており、解析にあたっては VERA グループと連絡を取りながら注意深く進めることが望まれる。また、これらの問題をあらかじめ回避するために、観測天体選定の際に 2 ビーム離角が小さく、かつ高度が高い天体ペアを選ぶことが強く推奨される。

3.8 観測天体に関する情報

時刻較正、バンドパス較正、あるいは、位相準拠用の参照電波源として観測可能な連続波天体については、米国国立電波天文台 (NRAO) の VLBA キャリブレーションサーベイが有用である。VLBA のホームページ

<http://www.aoc.nrao.edu/vlba/html/vlbahome/observer.html>

にて天体検索や全リストの取得が可能である。参照電波源は、前項で述べた最小検出フラックス以上のものが必須であり、また、時刻較正やバンドパス較正用のキャリブレーションは 1 Jy 以上のものが望ましい。

水メーザー源のカタログについては、イタリア アルチェトリ天文台の

The Arcetri Catalog of H₂O maser sources

が有用である (Valdettaro et al. 2001, A&A, 368, 845)。ただし、メーザー源のフラックスについては強度変動が激しく、また、VLBI で観測すると分解されて相関強度が著しく低下することがあるので注意が必要である。また、カタログ中の位置精度も最大数 10 秒角の誤差を持ったものがあり、これも注意が必要である (通常、観測および相関処理に際しては 1 ~ 数秒角程度の位置精度が要求される)。

3.9 野辺山 45m、鹿島 34m の参加について

今回の試験的共同利用では、国立天文台野辺山 45m 望遠鏡および情報通信研究機構鹿島 34m 望遠鏡を VERA4 局に加えたアレイでの観測も可能である。この両局の性能等については、J-Net のホームページ等を参考されたい。両局の参加不参加は観測提案の科学的価値および両局の混雑度を考慮しながら、野辺山および VERA のプログラム小委員会にて決定される。ただし、野辺山および鹿島局の記録系は DIR1000 系 (記録速度 128MHz) のみであり、VERA4 局を含めた 6 局 15 基線の相関は DIR1000 系を用いた場合のみ可能であることに注意が必要である。各局のレコーダー配備状況を表 8 にまとめる。また、図 9 に、全 6 局で観測した場合の UV 例を示す。

表 8: レコーダーの配備状況

レコーダー	水沢	入来	小笠原	石垣島	野辺山	鹿島
DIR-1000 (記録速度 128Mbps)	o	o	o	o	o	o
DIR-2000 (記録速度 1024Mbps)	o	o	o	o	x	x

3.10 観測データの公開について

共同利用で取得した観測データは、相関処理終了後 18ヶ月でアーカイブデータとして一般に公開される。

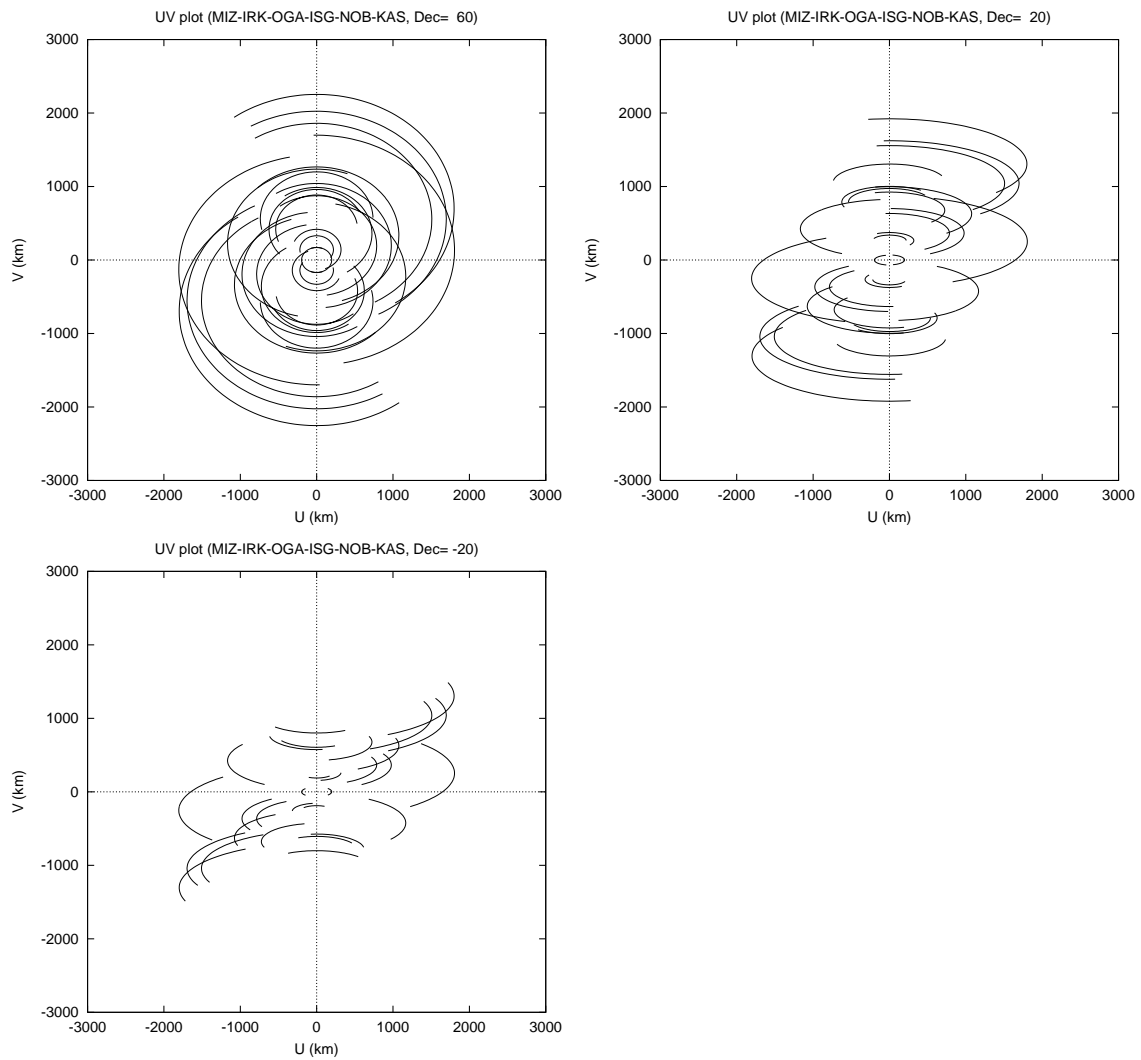


図 9: VERA4 局 + 野辺山 45m + 鹿島 34m で観測時の UV カバレッジ。全局とも EL20 度以上で観測したとして計算。左上、右上、左下の順に、天体の赤緯 60°、20°、-20°。

4 観測の実行とデータ解析

4.1 観測の準備

観測提案者は観測提案が受理されたら、指定された期日までに観測スケジュール作成を要求される。観測スケジュールの作成については、別途示される作成の手引きを参照のこと。また、スケジュール作成にあたっては、相談役としてVERA側のコンタクトパーソンが決められるので、問題等あれば連絡をとりながらスケジュール作成を進める。

4.2 観測、相関処理

観測運用および相関処理については、基本的にVERAグループが行い、観測提案者に要求される作業はない。観測および相関処理終了後、観測提案者には相関処理済み観測データがFITS形式で渡される。相関処理済みの観測データは通常FITSデータ送付後3ヶ月でリリースされるので、もし再度の相関処理を希望する場合には、この期間内にVERAプロジェクト側にその旨連絡する必要がある。

4.3 データ解析

現状VERA用の位置天文データ解析ソフトは開発途中であり、当面の間観測提案者はFITS形式のデータをAIPS上で処理することを要求される。その際、温度較正や位相較正など必要な較正情報もAIPSに取り込める形で別に提供される。

参考資料

VERA Web page (VERAに関する情報全般): <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp>

VLBA Calibrator Survey (VLBA キャリブレーターカタログなど):

<http://www.aoc.nrao.edu/vlba/html/vlbahome/observer.html>

Arcetri Maser Survey (水メーザーのカタログ):

Valdettaro et al. 2001, A&A, 368, 845

J-Net Web page (J-Net、野辺山、鹿島のVLBI情報、FRINGEファインダーの情報など): <http://www.nro.nao.ac.jp/~miyajji/Jnet/>

AIPS (解析ソフトAIPSに関する情報): <http://www.aoc.nrao.edu/aips/>

表 9: 連絡先

氏名	メールアドレス	分野
小林 秀行	hkobaya@hotaka.mtk.nao.ac.jp	プロジェクト統括、アンテナ、相関器
川口 則幸	kawagu@hotaka.mtk.nao.ac.jp	システム全般、受信機、デジタル系
真鍋 盛二	manabe@miz.nao.ac.jp	解析ソフト
亀谷 収	kameya@miz.nao.ac.jp	観測局全般
柴田 克典	k.m.shibata@nao.ac.jp	観測運用、スケジュール作成
田村 良明	tamura@miz.nao.ac.jp	測地システム
廣田 朋也	tomoya.hirota@nao.ac.jp	単一鏡性能
本間 希樹	honmamr@cc.nao.ac.jp	位相較正