2005年度 VERAステータスレポート

国立天文台VERA観測所

第1.2版2005年11月2日

目 次

1	200	4 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	その他観測機器	4
	1.4	相関器	4
	1.5	局位置	5
	1.6	局運用	5
•		_ ,	0
2	シス		6
	2.1	アレイ	6
	2.2		8
		2.2.1 基本設計	8
		2.2.2 駆動糸	8
		2.2.3 開口能率	8
		2.2.4 能率の仰角依存性	9
		2.2.5 能率の離角依存性	9
		2.2.6 ビームパターン、ビームサイズ	10
		2.2.7 指向精度(ポインティング)	12
		2.2.8 スカイライン	15
	2.3	受信機	16
	2.4	周波数変換部	17
	2.5	デジタル信号処理部・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
	2.6	データ記録系	18
	2.7	相関処理	18
	2.8	各種較正	20
		2.8.1 時刻較正、バンドパス較正	20
		2.8.2 温度較正	20
		2.8.3 位相較正	20
	2.9	測地	20
		2.9.1 測地観測の観測周波数帯域	21
		2.9.2 観測モード、バックエンド装置	21
		2.9.3 局位置の決定方法、精度	21
		2.9.4 GPS とのコロケーション観測	22
		2.9.5 GPS による湿潤大気遅延の推定など	22
		2.9.6 プレート運動など	23
		2.9.7 地球回転パラメータ	23
	2.10	総合的な位置天文精度	24

3	観測	提案に際して	25
	3.1	観測期間、観測時間	25
	3.2	観測可能なモード....................................	25
	3.3	観測提案者に要求される条件	25
	3.4	観測天体に関する制限	25
	3.5	分解能	26
	3.6	感度	26
	3.7	システム雑音温度....................................	28
	3.8	位置天文観測	28
	3.9	観測天体に関する情報	28
	3.10	野辺山 45m、鹿島 34m の参加について	29
	3.11	観測データの公開について.................................	29
4	観測	の実行とデータ解析	31
	4.1	観測の準備	31
	4.2	観測、相関処理	31
	4.3	データ解析	31

はじめに

VERAの共同利用観測も3年目を迎えます。今年は、フィドームの改修を行いましたので、43GHz帯をオープンしますが、アストロメトリ観測の性能を十分に確認するには至りませんでしたので、試験的共同利用とし、国内の研究者のみにオープンします。ようやく VERA は、科学的な成果をあげられる状態になっています。位相補償や広帯域観測などの装置性能を活かした独創性のある観測提案を期待しています。

VERA 観測所長 小林 秀行

1 2004年度からのシステム更新状況

1.1 アンテナ

昨年度の水沢局に加えて、今年度は残り3局でもフィドームの改修を行った。 この結果、フィ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。43 GHz帯では、システム雑音温度が20-30 K ほど下 がり、大幅な性能向上を進めた。またアンテナ制御系において軽微な不具合が発生 しているが、予備品等により対処している。保守については、小笠原局におけるさ びの進行が当初の想定より早く進んでおり、今年度に対策を施す。

2004年12月以降にポインティングにおける大気差補正計算のバグが修正され、 指向精度が大幅に向上した。また、能率の離角依存性、仰角依存性についても最新 の測定値に更新された。

1.2 受信機

2005年夏季の定期メンテナンスで、不具合の生じた箇所の補修などを行っている。また、これまで停電などで受信機が冷却中に電源が断になると発振が起こり、正常復帰のためには常温に戻さなければならなかったが、「発振止め」回路を追加することで冷却時でも発振を止めることができるように対処した。「発振止め」はLEDにより光を照射させ、半導体の特性を変化させることで行っている。

1.3 その他観測機器

サンプラを従来のテクトロニクス社製からデジタルリンク社製の ADS-1000 に 交換した。テクトロニクス社製のサンプラはデジタルオシロスコープを改造したも のであること、同機種のオシロスコープは製造中止になったこと、などの理由から、 国内のVLBI研究者 (NICT 鹿嶋のグループ)が開発した VLBI 専用のサンプラに 交換した。ADS-1000 のサンプリング特性 (位相ジッタ) などについては、性能上問 題がないことが確認されている。

また、デジタル系バックエンド、レコーダなども夏季に集中的にメンテナンス を行っている。

1.4 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。

相関処理時の遅延追尾補正ツールを作成している。現在精度検証段階にあり、位相補償マップの画質に改善が見られた観測もある。

1.5 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。VERA 内部での測地観測も定常 的に行われている。また、新たに変位速度も与えられている。

1.6 局運用

2004年9月以降に定常運用が始まった網運用ソフトにより、水沢にあるAOC(Array Operation Center)からの自動運用を行っている。網運用ソフト、観測局における各 装置の制御ソフトはアップグレードが進められている。

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	-3857241.8226	3108784.8097	4003900.5431	Vm	VERAMZSW	7362
入来	-3521719.5860	4132174.6744	3336994.2244	Vr	VERAIRIK	7364
小笠原	-4491068.8117	3481544.7906	2887399.5669	Vo	VERAOGSW	7363
石垣島	-3263994.7258	4808056.2881	2619949.2188	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) $\beth- \nvDash$

局名	X (m/yr)	Y (m/yr)	Z (m/yr)
水沢	0.0011	0.0102	-0.0058
入来	-0.0264	-0.0079	-0.0188
小笠原	0.0214	0.0324	0.0152
石垣島	-0.0417	0.0024	-0.0512

座標値はすべて 2005.0 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° ~ 2.2°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。

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

表 2: VERA アンテナ駆動性能

* 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帯ともに 160 K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。

2004年10月以降、2ビーム駆動装置(ジャッキ)の検査、フィドーム交換などの作業を行ったため、能率が変化していないかどうか、今季共同利用開始前に能率再測定を行う予定である。

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

表 3: Aperture efficiency of the VERA 20m antenna

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。2004年12月から2005年3月までの測定結果 の例については、図2にまとめた。2004年10月のステータスレポートでは、全局 で低仰角(EL<20度)になると能率が高仰角での値に比べて20%以上低下する傾向 が確認されていたが、これはポインティングにおける大気差補正計算のバグによっ て、低仰角で指向精度が悪化していたことも要因として考えられる。ポインティン グにおける大気差補正のバグ修正後は、低仰角での能率の低下も最大で10%程度と なっている。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。測定結果の例については、図3にま とめた。K帯、Q帯ともに、2ビーム間の離角が広がると能率が下がる傾向が確認さ れている。ただし、Q帯については、受信機が中心にあるときよりも離角が0.5-1.0 度(中心からのオフセットは0.25-0.5度)の範囲で能率が最大となっている。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。



図 2: 入来局における能率の仰角依存性の測定例。能率の基準データは EL=50 度での測定値。(左)K 帯、2005 年 2 月 8 日測定。(右)Q 帯、2005 年 2 月 12 日測定。



図 3: 入来局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。曲線は、能率の仰角依存性を4次関数でフィッティングした結果。(左)22 GHz 帯、2004 年 3 月 4 日測定。(右)Q 帯、2004 年 3 月 5 日測定。

2.2.6 ビームパターン、ビームサイズ

VERA20 m アンテナの K 帯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 帯ともまとめる。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 4: 入来局、K 帯受信機 A、離角 0.0 度のビームパターン(上)と、小笠原局、K 帯受信機 A、離角 2.0 度のビームパターン(下)。 いずれも、W49N の水メーザーを 75"角グリッドでマッピング。

		HPBW[AZ]	HPBW[EL]	
局名	帯域	(arcsec)	(arcsec)	データ数
水沢	Κ	$148.14{\pm}8.36$	$146.65 {\pm} 9.01$	478
入来	Κ	$148.10{\pm}12.66$	$148.33{\pm}12.64$	840
小笠原	Κ	$152.87 {\pm} 9.24$	$152.38 {\pm} 9.28$	1725
石垣島	Κ	$153.09{\pm}11.53$	$153.70{\pm}12.23$	871
水沢	Q	$74.48{\pm}7.66$	$70.09{\pm}9.55$	183
入来	Q	$78.41{\pm}7.40$	$77.02 {\pm} 7.52$	562
小笠原	Q	$77.72 {\pm} 7.05$	$76.79{\pm}7.53$	312
石垣島	Q	$78.77 {\pm} 8.32$	$77.08 {\pm} 8.47$	246
ᆂᆣᆂᆣᆤ	ま (白 ギ	(1)		

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

誤差は標準偏差(1σ)

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。強度が強く かつ位置が正確(~数秒角の精度)なメーザー源をAZ、EL3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

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

$$\delta El = A_1 \cos(Az) + A_2 \sin(Az) + A_6 + A_7 \cos(El) + A_8 \sin(El) +$$
(1)

$$A_9 \cos(2Az) + A_{10} \sin(2Az) + A_{13} \left[\frac{El - 40}{30}\right] + A_{14} \left[\frac{El - 40}{30}\right]^2 \tag{2}$$

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。

2004年10月版のステータスレポートでは、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。2004年10月のユーザーズミーティング以降、この原因を調査した結果、ポインティングの大気差補正計算にバグがあったためということが判明した。

大気差補正計算プログラムを修正後、2004年12月-2005年3月に全局でポインティング観測、器差補正を行った結果、低仰角でのポインティング精度が大幅に向上した。器差補正では、2004年12月までは A_1 - A_6 と A_9 - A_{14} の12パラメータによって低仰角のポインティングオフセットを補正していたが、2004年12月以降の器差補正では標準的な A_1 - A_{12} のパラメータに変更した。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。

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、過去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。



図 5: 水沢局アンテナ Q 帯のポインティング残差。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。2005 年 3 月の測定結果。



図 6: 入来局 K 帯受信機 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 (W3OH 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。

			σ^a	σ^b_{AZ}	σ^c_{EL}
Site	Band	Date	(arcsec)	(arcsec)	(arcsec)
MIZ	Κ	Mar.2005	10.544	7.850	12.679
MIZ	Q	Mar.2005	6.384	5.462	7.189
IRK	Κ	Feb.2005	9.573	6.151	12.060
IRK	\mathbf{Q}	Feb.2005	7.079	5.243	8.528
OGA	Κ	Feb.2005	9.093	5.498	11.624
OGA	\mathbf{Q}	Mar.2005	7.828	5.946	9.338
ISG	Κ	Mar.2005	12.283	10.552	13.798
ISG	\mathbf{Q}	Mar.2005	6.915	5.800	7.874

表 5: VERA 20m アンテナの指向精度

a: Standard deviation.

b: Standard deviation for AZ.

c: Standard deviation for EL.

VERA 各局アンテナのスカイラインを図7に示した。小笠原局のほぼ全方位、石 垣局の北東方向には山があるため、観測可能な仰角は10-20度以上となるため、注 意を要する。



図 7: VERA 各局アンテナのスカイライン。方位角0度が真北。天体の追尾は仰角5度まで可能。

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式づつ配備されており、共同利用では公開されない。表 6、図8にK帯、Q帯の受信機性能についてまとめる。

帯域	受信可能周波数带	受信機雑音温度	受信偏波
Κ	21.5 - 23.8 GHz	$30\sim50~{\rm K}$	左旋円偏波
Q	42.5 - 44.5 GHz	$70\sim90~{\rm K}$	左旋円偏波

表 6: VERA 受信機性能



図 8: VERA の受信機雑音温度:(上)K-band。周波数軸 (IF 周波数) に 16.8 GHz を加算することで RF 受信周波数が算出できる。小笠原局の雑音温度が若干高くなっている。(下)Q-band。周波数軸に 37.5 GHz を加算することで RF 受信周波数が算出できる。



図 9: VERA の周波数変換部の概念図

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帯では16.8GHz、Q帯で は37.5GHz である。IF は各ビームごとに1チャンネルづつある。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9に周波数変換部の概念図をまとめる。

2.5 デジタル信号処理部

ベースバンド出力 ($0 \sim 512$ MHz 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)。

$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	モード名	レート	総 CH 数	各 CH 帯域幅	CH 番号	ビーム	帯域
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	VERA1	$1024 \mathrm{Mbps}$	2	$128 \mathrm{~MHz}$	1	А	256 - 384 MHz
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$					2	В	256 - $384~\mathrm{MHz}$
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 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 16 B 272 - 288 MHz 16 B	VERA7	$1024 \mathrm{Mbps}$	16	$16 \mathrm{~MHz}$	1	А	256 - 272 $\rm MHz$
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$					2	В	128 - 144 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 18 320 - 336 MHz 36 - 352 MHz 19 B 256 - 272 MHz 14 B 320 - 336 MHz 15 B 336 - 352 MHz 16 B 256 - 272 MHz 2 B 256 - 272 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 7 A					3	В	144 - $160~\mathrm{MHz}$
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 18 320 - 336 MHz 3 19 B 256 - 272 MHz 10 B 256 - 272 MHz 16 B 352 - 368 MHz 16 B 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz					4	В	160 - 176 $\rm MHz$
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 17 A 256 - 272 MHz 18 304 - 320 MHz 14 19 352 - 368 MHz 10 B 352 - 368 MHz 16 B 352 - 368 MHz 16 B 372 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 7 <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>5</td> <td>В</td> <td>176 - 192$\rm MHz$</td>					5	В	176 - 192 $\rm MHz$
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 18 342 - 2288 MHz 346 - 352 MHz 19 B 20 - 336 MHz 10 B 352 - 368 MHz 14 B 320 - 336 MHz 15 B 352 - 272 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 8 B 304 - 320 MHz </td <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>6</td> <td>В</td> <td>192 - 208$\rm MHz$</td>					6	В	192 - 208 $\rm MHz$
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 3 A 272 - 288 MHz 2 B 256 - 272 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 7 A 304 - 320 MHz 9 A 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 11 A					7	В	208 - $224~\mathrm{MHz}$
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 366 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MH					8	В	224 - 240 MHz
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$					9	В	240 - $256~\mathrm{MHz}$
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 1 A 256 - 272 MHz 2 B 256 - 272 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 7 A 304 - 320 MHz 8 B 304 - 320 MHz 8 B 304 - 320 MHz 9 A 320 - 336 MHz 11 A 336 - 352 MHz 10 B 320 - 336 MHz 11 A 352 - 368 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz <					10	В	256 - $272~\mathrm{MHz}$
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 1 A 256 - 272 MHz 2 B 256 - 272 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 7 A 304 - 320 MHz 9 A 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 11 A 336 - 352 MHz 11 A 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz <t< td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td>11</td><td>В</td><td>272 - 288$\rm MHz$</td></t<>					11	В	272 - 288 $\rm MHz$
13 B 304 - 320 MHz 14 B 320 - 336 MHz 15 B 336 - 352 MHz 16 B 352 - 368 MHz VERA10 1024Mbps 16 11 A 256 - 272 MHz 2 B 256 - 272 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 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 8 B 304 - 320 MHz 9 A 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 11 A 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz 13 A 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 15 <t< td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td>12</td><td>В</td><td>288 - $304~\mathrm{MHz}$</td></t<>					12	В	288 - $304~\mathrm{MHz}$
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 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 8 B 304 - 320 MHz 8 B 304 - 320 MHz 9 A 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 11 A 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 15 A 368 - 384 MHz					13	В	304 - $320~\mathrm{MHz}$
15 B 336 - 352 MHz 16 B 352 - 368 MHz VERA10 1024Mbps 16 1 A 256 - 272 MHz 2 B 256 - 272 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 7 A 304 - 320 MHz 9 A 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 11 A 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz 13 A 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 15 A 368 - 384 MHz 16 B 368 - 384 MHz					14	В	320 - $336~\mathrm{MHz}$
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 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 288 - 304 MHz 7 A 304 - 320 MHz 7 A 304 - 320 MHz 8 B 304 - 320 MHz 9 A 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 10 B 320 - 336 MHz 11 A 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 15 A 368 - 384 MHz 16 B 368 - 384 MHz 16 B 368 - 384 MHz					15	В	336 - 352 $\rm MHz$
VERA10 1024Mbps 16 16 MHz 1 A 256 - 272 MHz 2 B 256 - 272 MHz 3 A 272 - 288 MHz 3 A 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 4 B 272 - 288 MHz 5 A 288 - 304 MHz 5 A 288 - 304 MHz 6 B 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 10 B 320 - 336 MHz 11 A 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 12 B 336 - 352 MHz 13 A 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 15 A 368 - 384 MHz 16 B 368 - 384 MHz					16	В	352 - $368~\mathrm{MHz}$
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	VERA10	$1024 \mathrm{Mbps}$	16	$16 \mathrm{~MHz}$	1	А	256 - $272~\mathrm{MHz}$
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					2	В	256 - 272 $\rm MHz$
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					3	А	272 - 288 $\rm MHz$
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					4	В	272 - 288 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					5	А	288 - $304~\mathrm{MHz}$
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					6	В	288 - $304~\mathrm{MHz}$
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					7	А	304 - $320~\mathrm{MHz}$
9 A 320 - 336 MHz 10 B 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					8	В	304 - $320~\mathrm{MHz}$
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					9	А	320 - $336~\mathrm{MHz}$
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					10	В	320 - $336~\mathrm{MHz}$
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					11	А	336 - 352 $\rm MHz$
13 A 352 - 368 MHz 14 B 352 - 368 MHz 15 A 368 - 384 MHz 16 B 368 - 384 MHz					12	В	336 - 352 $\rm MHz$
14 B 352 - 368 MHz 15 A 368 - 384 MHz 16 B 368 - 384 MHz					13	А	352 - $368~\mathrm{MHz}$
15 A 368 - 384 MHz 16 B 368 - 384 MHz					14	В	352 - $368~\mathrm{MHz}$
16 B 368 - 384 MHz					15	А	368 - 384 $\rm MHz$
					16	В	368 - 384 MHz

表 7: VERA デジタルフィルタモード

VERA7、10 に関しては仕恵の 2CH を DIR1000 糸に同時記録可能。

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 中はアンテナフィドーム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。その際、フィドーム周囲に90度おきに配置された4つの 雑音源のうち、1つのみを点灯させる1-NSCモードと、4つを交互に点灯させて平 均を取る4-NSCモードがある。水沢局のVLBI用10mアンテナとVERA20mアン テナの間で行った位相較正精度検証実験により、1-NSCモードではRMS位相残差 でおよそ0.2 mm、4-NSCでは0.12 mmの精度が達成されている。これは2つのア ンテナ間の残留大気差込みの数字であり、4-NSCモードの場合、VERAで10マイ クロ秒角の位置天文精度を達成するために必要な精度である0.1 mmの較正精度を、 ほぼ達成している。

2.9 測地

アンテナの座標値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や解析の際に利用される。VERA 局間の相対的な基線決 定はVERA の4局で閉じた観測として行われる。また、国際座標系(ITRF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、および K5 VSSP 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(計 128Mbps 記録)であり、チャンネ ル割り当ては、S帯、X帯各 8 チャンネルとなっている。国土地理院との測地観測 は、2005 年 3 月までは K4 システム、同年 4 月からは K5 VSSP システムに移行し ている。また、2005 年 3 月の観測では、K4 と K5 の比較観測が行われている。

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(計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 専用のターミナル S/RTP が RISE グループにより 各局に配備されている。Pcal 装置は、国土地理院との VLBI 観測対応のため、これ まで水沢局にしか配備していなかったが、RISE 観測に対応して、現在 VERA 全局 に配備されている。

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(2005年3月版)である。ITRF2000による座標値(元期1997年)が求め られているが、変位速度を加えて元期を2005年に合わせている。VEARではITRF 系との結合精度の目標を10mmとしているが、3次元の各座標の推定精度は9mm~ 12mmとなっており、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 ていおり、この精度の改善と座標系の維持がなされる。

一方、入来局、小笠原局、石垣島局の座標は、水沢局の座標を既知として、VERA 網内の測地 VLBI 観測により求められている。VERA 網内の測地観測は、2004年11 月より定期的な観測が始まり、メインテナンス期間を除き、月に2回の観測が実施 されている。昨年までは、座標値を GPS 観測から求めていたが、今年からは VLBI 自身により座標が決定されるようになったことが、この1年間の最大の進捗である。 VERA 網内での測位精度は、1回の観測でおよそ水平位置で2mm、上下位置で8mm 程度となっている。これまで実施した10回程度の観測から、VERA 網内では3次元 の座標値で2mm~4mmの精度が得られている。

局の変位速度については、VLBI 自身の観測期間がまだ十分長くないことから、 GPS の連続観測から求めた値の方が精度が高いと考えられる。表2には GPS によ る速度をあげている。水沢局に関しては、元期 1997 年から 2005 年への引き直しは VLBI 観測による速度を用いる一方で、速度の表には GPS による値をあげている。

元期を2005年としているのは、VLBI観測開始時期に近い日時を選んだためである。ITRF2000では、元期を1997年に取ることになっているが、観測開始時期より8年遡ることで速度の誤差により座標誤差が拡大されるため、元期を2005年としている。

2.9.4 GPS とのコロケーション観測

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)がネックとなり、VLBIと GPS の 座標比較では 10mm ~ 数 10mm の差が見受けられる。

2.9.5 GPS による湿潤大気遅延の推定など

GPSの観測は、これまで局の初期座標を与えたり、変位速度を求めるために使われてきたが、測地 VLBI 観測が定常化するにつれて、他の目的でも有用な役割を 果たすようになっている。

GPSの定常的な解析では、湿潤大気による遅延を5分間隔で推定している。測地 VLBI 観測でも湿潤大気による遅延を推定しているが、時間分解能は高々1時間しか ない。GPS による推定値を解析に取り込めば、大気状態の急速な変動への対応や、 未知数を減らすことによる位置決定精度の向上が期待できる。また、アストロメト リ観測、マッピング観測においては、通常 VLBI 観測からだけでは湿潤大気遅延の 推定ができない。そこで、GPS による推定値を解析に取り込めば、アストロメトリ 観測、マッピング観測においても精度向上が可能であり、実際の解析でも精度の向 上が図られている。

GPSによる湿潤大気の遅延の推定は定常的に行われているが、これまでは観測点の座標変化を求めることを主眼に解析が行われてきたので、必ずしも大気遅延の推

定に最適化した解析が行われてきた訳ではない。たとえば、日付の変わり目(解析 区間の変わり目)で、推定値が不連続になる場合があるなどの問題もある。今後、 湿潤大気遅延の推定に特化した解析も試みていきたい。

GPSの観測では、また、L1 波とL2 波の疑似距離の差から、電離層の電子密度の 推定も比較的容易に行うことができる。衛星の視線方向の電子密度の推定になるが、 この情報もアストロメトリ観測、マッピング観測の精度向上に必要なデータとなり 得る。試験的な解析で、観測精度の向上が見込まれることが分かれば、解析の定常 化も検討したい。

2.9.6 プレート運動など

プレート運動の速度は、最大 66mm / 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 日と 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震 では、水沢局に 10~15mm の変位が生じている(表 8)。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。2003 年 5 月 26 日以前は、座標値からこの表の dx、dy、dz の値を引き、また、2005 年 8 月 16 日以降は座標値にこの表の値を加える必要がある。なお、2005 年 8 月 16 日の値 は暫定的な値であり、今後改訂されることがある。

また、GPSの観測からは、振幅が最大 5mm に近い座標値の年周変動が見うけられるが、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、GPSの結果と比較した上で、変動をモデル化する予定である。

年.	月.日	$\mathrm{EW}(\mathrm{mm})$	NS(mm)	UD(mm)	dx(mm)	dy(mm)	dz(mm)
03	.05.26	-12.3	7.2	11.4	4.4	12.2	12.8
05	.08.16	8.9	-12.4	-2.5	-10.1	-3.2	-11.3

表 8: 宮城県沖地震による水沢局のステップ的変位(GPS 観測による値)

2.9.7 地球回転パラメータ

VERA では、地球回転パラメータ(X、Y、 $\Delta UT1$ 、 $\Delta \phi$ 、 $\Delta \varepsilon$)はルーチン的に 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

昨年度まで VERA の位置天文計測精度を制限していた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 作成され、現在精度検証段階にある。これに代わって、現在の VERA の位置天文 計測精度を決定している最大の要因は、2天体間で仰角が異なるために発生する大 気遅延差($\Delta \sec Z$ 効果)である。離角が大きい天体や仰角が低い天体ではこの影 響が大変大きく、位相補償して得られる天体の像が正しく収束しないという問題が 報告されている。この問題の解決方法として、固定値の天頂遅延残差 + マッピング ファンクションによる仰角依存性を考慮して、2 ビーム位相補償イメージから大気 遅延差を補正する方法が提案されている。この方法をもちいると、位相補償後のイ メージの収束度は大きく改善し、このような補正をした場合に位置天文精度として 0.1 mas を切るような精度が得られることが報告されている。現在解析グループで は AIPS 上でこのような補正を行うルーチンを開発中であるが、あらかじめ大気遅 延差の影響を最小限に抑えるためには、2 ビーム離角が小さく、かつ高度が高い天 体ペアを選ぶことが推奨される。

3 観測提案に際して

今年度は、アストロメトリ観測性能が確認されておらず、試験的な共同利用観測を 継続することになった。しかし、フィドームの改修・受信機性能の向上により 43GHz において科学的な観測を行うことができるようになったと判断し、共同利用に供する。

3.1 観測期間、観測時間

共同利用に供する時間は、昨年同様 200 時間である。そのうち 100 時間が、野辺山 45m、鹿島 34m と共同で観測する。VERA のみの場合は、観測可能な期間は 2006年1月から 12月までの予定である。ただし、7月から 8月はメンテナンスのために観測を中断する予定である。野辺山については、マスターコリメータの改修のために、3月末から 5月初めまでの運用となるので注意をしていただきたい。

3.2 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、K帯(22GHz帯)、Q帯 (43 GHz帯)であり、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)。

3.3 観測提案者に要求される条件

2005 年度の共同利用も、2004 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。

3.4 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)

3.5 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。

3.6 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 $\sigma_{
m bl}$ は

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

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帯の場合)。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 = 128MHz、 $\tau = 120$ sec、 $T_{sys} = 200$ K を代入すると、 $\sigma_{bl}=23$ 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、フリンジ検出に必要な 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 KHz となり、 $\sigma_{bl}=1.5$ 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。

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

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 7 の平方根に比例して S/N が改善される。



図 10: 水沢局における天頂でのシステム雑音温度と受信機雑音温度。測定は「secZ 法」により行った。+は受信機雑音温度、は天頂方向のシステム雑音温度(2004 年 4 月 ~ 2005 年 10 月)。

3.7 システム雑音温度

図 10 に、水沢局の K 帯での受信機雑音温度(フィドー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。 K 帯では、冬場の晴天時の典型的な値で $T_{sys} = 150$ K となっているが、夏場には $T_{sys} = 300$ K 以上まで上昇している。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。一方、Q 帯では受信機雑音温度が K 帯よりも高く、システム雑音は 冬場の晴天時の典型的な値で $T_{sys} = 250$ K、夏場は $T_{sys} = 300 - 400$ K となってい る。Q 帯でも、局ごとの特性は K 帯同様に、小笠原局と石垣局でシステム雑音温度 が高い傾向が確認されている。

3.8 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ためである。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。

3.9 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キャリブレーター 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 リブレーターは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、

3.10 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9にまとめる。また、図11に、全6局で観測した場合のUV例を示す。

表 9: 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)	0	0	0	0	0	0
DIR-2000 (記録速度 1024Mbps)	0	0	0	0	x	x

3.11 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 11: 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。観測スケジュールは、VEX 形式となっている。観測スケジュール 作成のためのソフトは現在準備中である。詳細については、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 4mm 磁 気テープ (DDS, DDS3) もしくは DVD にて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テープは通常 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、各種 較正に必要な情報についても AIPS 上での処理が可能な形で提供される。

データ解析のフローのうち、VERA 固有の部分に限定して簡単に述べる。

- 振幅較正のデータについては、常温ダミーのチョッパーホイールを用いた方法 (いわゆる R-sky 法)によるシステム温度の情報と、アンテナ能率の仰角・離角 依存性の情報(ゲインカーブテーブル)がFITS 形式のファイル内に相関処理結 果とともに格納され、観測提案者に提供される。気象データについては現在提 供を行っていないが、観測提案者からの要望があれば温度・気圧・湿度の情報 を提供することが可能である。
- 較正雑音源を用いた 2 ビーム間の機械的位相差較正のデータは、AIPS の SN テーブルとして取り込むことができるテキストファイルが、FITS ファイルとと もに観測提案者に提供される。このテキストファイルを AIPS のタスク TBIN で取り込み、タスク CLCAL を実行してやることで較正を行うことができる。
- 位置天文観測の際に必要となる遅延追尾補正ツールは、プログラミングが終了

し現在精度検証の段階にある。このツールによる補正は、現在自動的には行われていないが、観測提案者からの要望があれば AIPS の SN テーブルとして取り込むことができるテキストファイルを提供することが可能である。

気象データの請求、遅延追尾補正ツールの処理依頼は、共同利用観測時に割り 当てられるコンタクトパーソンを通して対応する予定である。

なお、データに関する細かいバグなどについては、VERA データ解析の Web ページを作成するのでそちらをご覧いただきたい。遅延追尾補正ツールなど、各種 ツールのリリースについても Web ページ上で案内していく予定である。

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、フリンジファインダーの 情報など): http://www.nro.nao.ac.jp/~miyaji/Jnet/

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

表 10: 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
亀谷 收	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、データ解析