

SKA-VLBI 性能諸元

2018年7月9日

今井 裕(鹿児島大学)、赤堀卓也(国立天文台)、青木貴弘(山口大学)

概要 この文書ではSKA計画の外観をまとめた上で、SKA-VLBIの感度、角度分解能、視野などの性能諸元を示す。末尾には、本検討に用いた情報をまとめる。

1. はじめに

SKA 計画 SKA (Square Kilometre Array)は世界唯一で世界最高性能のセンチ波・メートル波干渉計を建設する計画である。第1期(SKA1)と第2期(SKA2)に分けて建設される。SKA1は2020年頃から建設、2024年に部分運用、2027年に本格運用する予定である。SKA2は2027年頃から建設し、2030年台中盤に運用する計画である。350 MHz以下を網羅する豪州のアレイLOWと、350 MHz以上を網羅する南アのアレイMIDから成る。

SKA1 と SKA2 SKA1-LOW(図1左)は最大基線長 65km の 512 の局から成り、1局は直径 38m・256 基のログペリから成る。ログペリの総数は 13.1 万基に達する。SKA1-MID(図1右)は直径 15m の SKA 鏡 133 台と直径 13.5m の MeerKAT 鏡 64 台から成り、最大基線長 150km に分布する。SKA2 はアンテナ数を約 10 倍し、最大基線長を数 100 km から数 1000 km に拡張する。詳しい諸元は以下のサイトにて公開されている。

<https://astronomers.skatelescope.org/documents/>

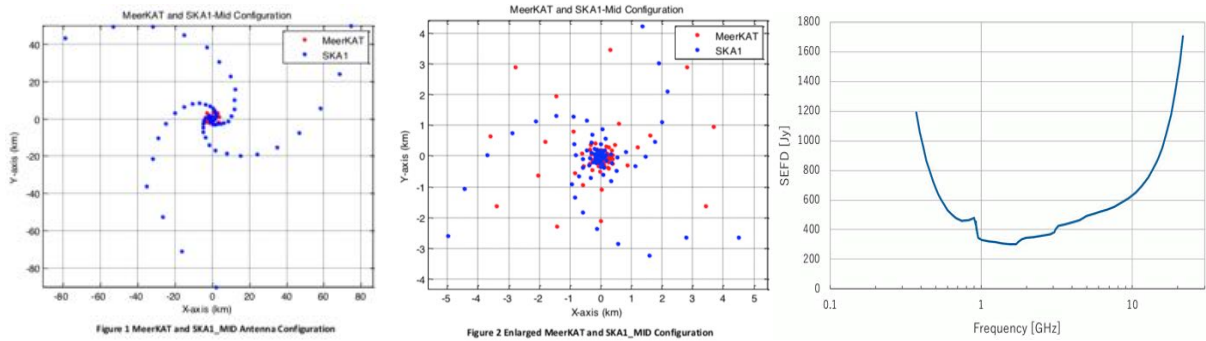


(図1) SKA1-LOW(左)とMID(右)の想像図。SKA機構HPのムービーより抽出。

2. SKA-VLBI とは

SKA-VLBI 「SKA-VLBI」とは「SKA局」と「パートナー局」とでVLBI観測を行うことである。本書では「SKA局」が何を指すのか、「パートナー局」にどのような候補があるのか、そして「SKA-VLBI」がどのような性能諸元を有するかを示す。なお、SKA-VLBIに関する検討は以下のSKA Science Book (2015)の143 (Paragi, Imai et al.)でもなされている。

<https://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=215>



(図 2) SKA1 のアレイ配置案 (左・中) と SKA-MID アンテナ 1 台の SEFD (右)。

SKA 局 SKA 局 (SKA1 局) は、図 2 左に示す SKA1-MID アレイのうち、中心部 (図 2 中) のアレイのみをフェーズアップして 1 つの VLBI 用ビームを合成するものである。フェーズアップをするこのサブアレイは半径 3-10 km 以内の「コア」と呼ばれる範囲である。SKA1 の全 197 台のうち 154 台 (78%) 程度がコアに配置される予定であり、そのうちの 90 台が直径 15m 相当の SKA 鏡、残り 64 台が直径 13.5m 相当の MeerKAT 鏡である。SKA の CSP (中央信号処理) では両方のアンテナを合わせてビームを合成することができる。

SKA 局の SEFD 後述する感度計算のために、SEFD (system equivalent flux density) 値を求めておくのが便利である。図 2 右には、SKA 鏡 1 台あたりの SEFD を示す。SEFD は周波数に依存する。SKA 局としての SEFD は MeerKAT 鏡も組み合わせるため計算がやや複雑となる。しかし 1GHz 以上では大雑把に次の関係式で近似できると考えられる。

$$SEFD_{SKA1} \approx 5 \text{ [Jy]} \exp[0.075(v/\text{GHz})] \quad (1)$$

ここで SKA 鏡 90 台と MeerKAT 鏡 64 台を考え、MeerKAT 鏡は SKA 鏡の 70% の SEFD と仮定した (つまり SKA 鏡 45 台分に相当)。また VLA でのフェイズアップの実績から、ビーム合成にて SEFD が 70% に低下すると仮定した。付録 A に SKA1 局の SEFD を示す。付録 A の SKA1 局は、1 GHz 以下は図 2 右から読み取った数値から算出し、1 GHz 以上は式 (1) を用いている。さて、SKA2 はこの 10 倍の性能であるとすれば次の通りである。

$$SEFD_{SKA2} \approx 0.5 \text{ [Jy]} \exp[0.075(v/\text{GHz})] \quad (2)$$

パートナー局 パートナー局は SKA 局と協同して VLBI 観測を実施できる相手局である。単一鏡あるいは干渉計が考えられる。

パートナー局の SEFD 付録 A にはパートナー局の性能諸元も示す。列挙したのは、詳細な局情報を調べることができた European VLBI Network と East Asian VLBI Network への参加局の一部である。SKA 時代にはさらに African VLBI Network が稼働するものの、2018 年現在はまだアンテナ改造中のものや建設計画段階のものがほとんどのため、列挙することは控えた。

3. SKA-VLBI の感度

基線感度 VLBI では較正天体が短時間で検出されていることがデータ較正をする際に必要である。その感度 (QSO など連続波源のスナップショット) は次の式を参照されたい。

$$\text{Baseline Sensitivity} \approx 140 \text{ } [\mu\text{Jy}] \frac{\sqrt{(SEFD_{SKA1}/5.0 \text{ Jy})(SEFD_{PTR}/40 \text{ Jy})}}{\sqrt{(\Delta\nu/0.1 \text{ GHz})(t_{\text{int}}/100 \text{ s})}} \quad (3)$$

ここで、 $SEFD_{SKA}$ は SKA 局の SEFD、 $SEFD_{PTR}$ はパートナー局の SEFD、 $\Delta\nu$ は周波数帯域幅、 t_{int} は積分時間である。規格化に用いている数値は、1 GHz の連続波観測を想定し、パートナー局に Parkes 64m 鏡程度の感度を想定した。

付録 B に SKA 局とパートナー局による基線感度を列挙する。積分時間を 100 秒、帯域幅を 100 MHz とした。パートナー局の観測周波数外の帯域、および SEFD を調べきれなかった局については 0 が記入されている。**SKA1 では 2.3 GHz 帯の要求は定まっているが実装の目処が立っていない。また 15 GHz 以上は要求そのものが未定義である。しかし、表中には式(1)(3)に基づいた仮定値を記載する。あくまで仮定なので取り扱いにはくれぐれも注意すること。**2.3 GHz 帯は追加の予算が確保された場合、搭載される可能性がある。15 GHz 以上は、鏡面自体が 50 GHz 程度まで受信可能であることに鑑み、検討の対象に含めることにした。

連続波感度 連続波源に対する SKA-VLBI の感度は次の式を参照されたい。

$$\text{Continuum Sensitivity} \approx 17.7 \text{ } [\mu\text{Jy}] \frac{\sqrt{(SEFD_{SKA1}/5.0 \text{ Jy})(SEFD_{PTR}/40 \text{ Jy})}}{(N_{\text{ant}}/4)\sqrt{(\Delta\nu/0.1 \text{ GHz})(t_{\text{int}}/400 \text{ s})}} \quad (4)$$

ここで N_{ant} はアンテナの数であり、Parkes 64 m 鏡級の感度を持つ 4 局のパートナー局を想定している。実際、Parkes をはじめ Effelsberg 100 m 鏡、Lovell 76m 鏡、Sardinia 64 m 鏡、Tianma 65m 鏡等の望遠鏡を想定することができる。

輝線感度 輝線に対する SKA-VLBI の感度は次の式を参照されたい。

$$\text{Line Sensitivity} \approx 17.7 \text{ } [\text{mJy}] \frac{\sqrt{(SEFD_{SKA1}/5.0 \text{ Jy})(SEFD_{PTR}/40 \text{ Jy})}}{(N_{\text{ant}}/4)\sqrt{(\Delta\nu/0.1 \text{ kHz})(t_{\text{int}}/400 \text{ s})}} \quad (5)$$

例えば OH メーザー輝線に対する SKA-VLBI の感度は、帯域幅を視線速度幅に置き換えて、次の式を参照されたい。

$$\text{Line Sensitivity} \approx 2.4 \text{ } [\text{mJy}] \frac{\sqrt{(SEFD_{SKA1}/5.0 \text{ Jy})(SEFD_{PTR}/40 \text{ Jy})}}{(N_{\text{ant}}/4)\sqrt{(\Delta\nu/1 \text{ km s}^{-1})(t_{\text{int}}/400 \text{ s})}} \quad (6)$$

4. SKA-VLBI の角度分解能と位置決定精度

角度分解能 角度分解能は次の式を参照されたい。

$$Angular\ Resolution \approx 1 \text{ [arcsec]} \frac{(\lambda / 10 \text{ cm})}{(B_{\max} / 100 \text{ km})} \quad (7)$$

ここで B_{\max} は最大基線長、 λ は観測波長である。付録 C に SKA とパートナー局による VLBI 角度分解能を列挙する。

位置決定精度 位置決定精度が熱雑音で決まる統計的位置誤差に支配されているとする(Moran et al. 1993)。決定誤差は次の式を参照されたい。

$$Position\ Accuracy \approx 1 \text{ [mas]} \frac{(\lambda / 10 \text{ cm})}{(B_{\max} / 1000 \text{ km})(R_{SN} / 10)} \quad (8)$$

ここで B_{\max} は最大基線長、 λ は観測波長、 R_{SN} は信号雑音比である。OH メーザーにおいて波長 18cm、信号雑音比 300 を仮定すると、6000 km 基線で誤差 10 μas に到達する。

5. SKA-VLBI の視野

視野 VLBI 観測の視野は次の式を参照されたい。

$$Field\ of\ view \approx 35.7 \text{ [arcsecond]} (\nu / 1 \text{ GHz})^{\frac{5}{2}} (B / 1000 \text{ km})^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

ここで ν は観測周波数である。しかし SKA-VLBI では、SKA 局の合成ビームサイズによる制約がある。SKA 局では 15m アンテナの主ビーム内に同時に最大 4 つの視野を合成(ビームフォーミング)することができる。ビームフォーミングされたそれぞれの視野(ビームサイズ)は次の式を参照されたい。

$$Field\ of\ view\ (Beam\ size) \approx 0.62 \text{ [arcsecond]} (\nu / 1 \text{ GHz})^{-1} \quad (10)$$

6. SKA-VLBI の観測モード

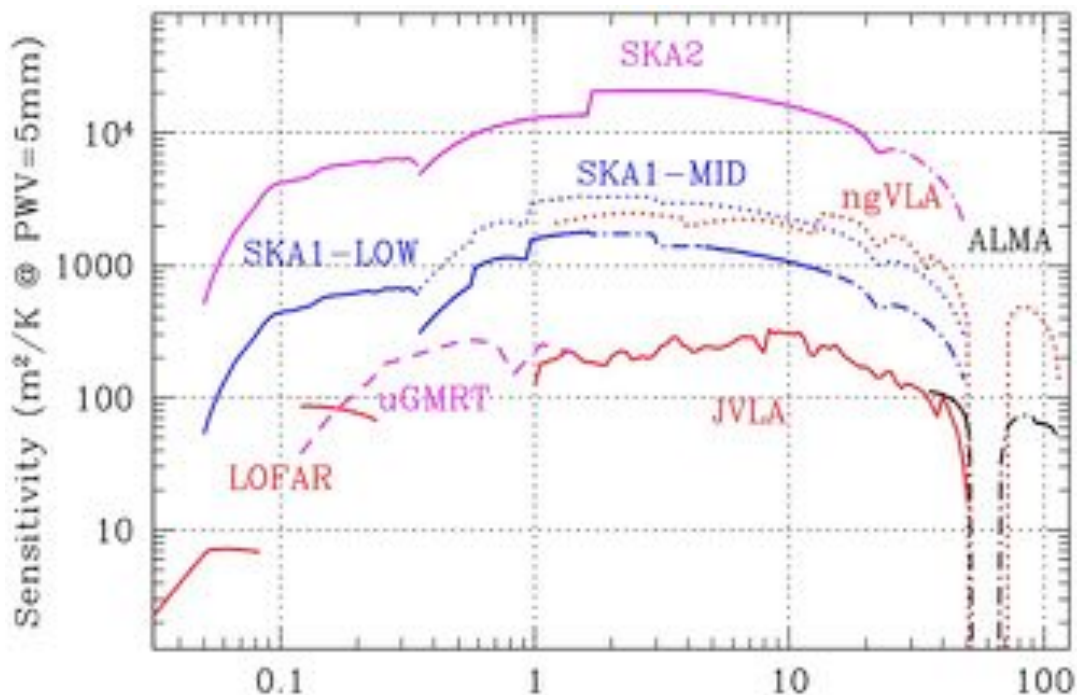
信号処理モード 中央信号処理部(CSP)には Frequency slice processors (FSPs)と呼ばれるバッファが 26 個あり、それぞれは最大で 200 MHz の幅を取ることができる。26 個のバッファは独立しているため、異なる信号処理モードで並行処理が可能となる。たとえば、Band1 では、4 FSP で連続波結像、2 FSP で輝線結像(zoom mode)、8 FSP でパルサーサーチ(マルチビーム)、4 FSP でパルサータイミング(マルチビーム)、そして 8 FSP で VLBI

といった芸当が可能である。最も帯域の広い Band5 にて、26 の FSP をすべて VLBI に費やせば、最大で 5.2 GHz のバンド幅で VLBI のビームを形成することも可能である。

データの受け渡し CSP の VLBI バックエンド部から出力される VLBI 観測のデータは VDIF フォーマットが予定されている。その観測データは 100 Gbps の光ケーブル線を通じて SDP センターに届けられる。SDP センターから先は検討中であるが、パートナー局の相関センターへ記録媒体を郵送、あるいはインターネットを経由して送信される。相関処理はパートナー局の相関センターで行なう。

7. 感度計算の詳細 (SKA-TEL-SKO-0000818 他)

感度 SKA では感度(Sensitivity)を $A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$ によって定義する。 A_{eff} は望遠鏡の有効開口面積、 T_{sys} は望遠鏡のシステム雑音温度である。図 3 には SKA を含む、いくつかの望遠鏡の Sensitivity ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$, 単位は m^2/K) を周波数の関数としてまとめる。



(図 3)感度の周波数特性。MID は SKA 鏡 133 台と MeerKAT 鏡 64 台の $A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$ の合計値。LOW は 256 基からなる 40m 局が 256 局とし、 $T_{408}=20\text{K}$ を仮定したときの、天頂角 45 度以内での平均値。SKA2-MID では SKA アンテナ 2000 台。0.35-1.67 GHz は PAF を仮定する。SKA2-LOW では 4880 局を仮定する。

有効開口面積 A_{eff} 有効開口面積 A_{eff} の理論値は次の式により計算される。

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{phys}} * \eta_A [\text{m}^2], \quad \eta_A = \eta_F * \eta_D * \eta_{\text{ph}}$$

ここで

$$A_{\text{phys}} = \pi (D/2)^2$$

は D [m²]を有効アンテナ直径とした物理開口面積、 η_A はアンテナの開口効率である。
 η_F はフィード照射効率で

$$\eta_F = \eta_{F0} - 0.04 |\log_{10}(\nu_{\text{GHz}})|$$

ν は観測周波数[GHz]。 η_{F0} はアンテナ係数で

$$\eta_{F0}=0.92 \text{ (SKA)}, 0.80 \text{ (MeerKAT)}$$

である。 η_D は回折ロス因子で

$$\eta_D=1 - 20 (\lambda / D)^{3/2}$$

を用いる。 λ は観測波長[m]。 η_{ph} は位相効率 で

$$\eta_{ph}=\exp[-(2\pi \delta / \lambda)^2]$$

を用いる。ここで δ は鏡面エラー $\delta = 2(A_p \varepsilon_p^2 + A_s \varepsilon_s^2)^{1/2}$ である。主鏡鏡面 RMS 誤差 $\varepsilon_p=280$ ミクロン、副鏡鏡面 RMS 誤差 $\varepsilon_s=154$ ミクロン、主鏡光学系誤差係数 $A_p=0.89$ 、副鏡光学系誤差係数 $A_s=0.98$ である。

システム雑音温度 T_{sys} システム雑音温度 T_{sys} の理論値は次の式により計算される。

$$T_{\text{sys}} = T_{\text{sum}} * [(h\nu / kT_{\text{sum}}) / \exp\{(h\nu / kT_{\text{sum}}) - 1\}] / \exp[-\tau_0 \sec(z)]$$

ここで

$$T_{\text{sum}} = T_{\text{rcv}} + T_{\text{spl}} + T_{\text{sky}}$$

天頂方向大気透過度 τ_0 、天頂角 z である。 T_{rcv} は受信機雑音温度で、科学要求から

$$T_{\text{rcv}}=15+30(\nu_{\text{GHz}}-0.75)^2 \text{ K (0.35-1.05 GHz, Band 1),}$$

$$T_{\text{rcv}}=7.5 \text{ K (0.95-4.6 GHz, Band 2-4),}$$

$$T_{\text{rcv}}=4.4+0.69 \nu_{\text{GHz}} \text{ K (4.6-50 GHz, Band 5-6)}$$

が典型的に採用される。 T_{spl} はスピルオーバー雑音温度で、科学要求から

$$T_{\text{spl}}=3 \text{ K}$$

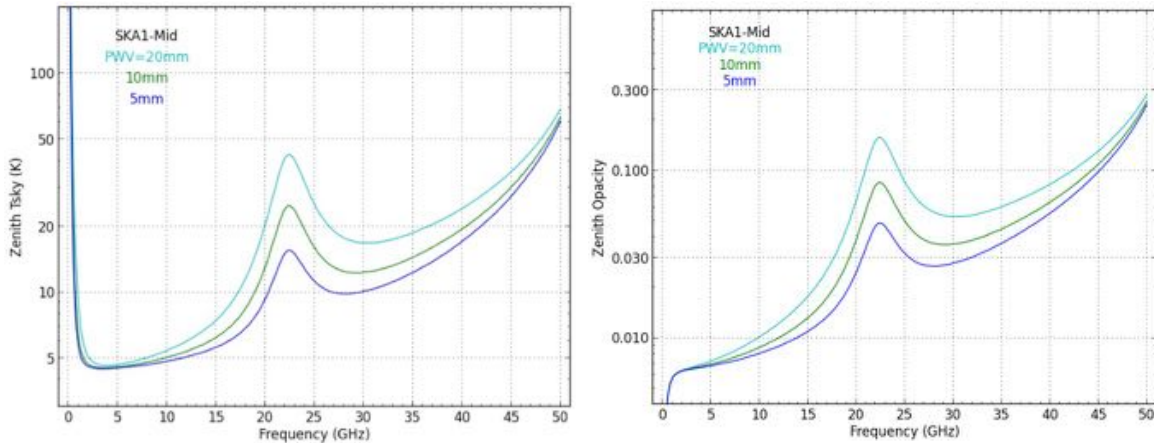
とする。 T_{sky} は天空温度で

$$T_{\text{sky}} = T_{\text{cmb}} + T_{\text{gal}} + T_{\text{atm}}$$

と書かれ、宇宙背景放射は $T_{\text{cmb}} = 2.73$ K。銀河自由放射は典型的に

$$T_{\text{gal}} = T_{408} (0.408 / \nu_{\text{GHz}})^{2.75} \text{ K}$$

とする。ここで 408 MHz 基準値 $T_{408} = 17.1, 25.2, 54.8$ K (10, 50, 90%範囲、座標に依存)とする。大気放射 T_{atm} は ATM コードと呼ばれるプログラムから算出する。参照値として高度 1100m, 気温 290K, 気圧 895hPa, 可降水量 5, 10, 20mm の値を図 4 に示す。



(図 4) 可降水量曲線(左)。天頂透過度曲線 (右)。

8. Level 1 System Requirements

最新版は 2017 年 7 月 31 日にリリースされたバージョン 11 である。

http://astronomers.skatelescope.org/wp-content/uploads/2017/11/SKA-TEL-SKO-0000008-Rev11_SKA1SystemRequirementSpecification.pdf

SKA1-LOW 及び MID を用いた VLBI の要求仕様はそれぞれ 5.1.8 章と 5.3.5 章に記載されている。また、関連する SKA1-CSP における beam forming の要求も示されている。

- **SKA1-SYS_REQ-3540 Coherence of SKA1_Low tied-array beams**
SKA1_Low shall form pulsar search, pulsar timing, and VLBI tied-array beams that each have a coherence within 5% of that allowed by the current atmospheric conditions.
- **SKA1-SYS_REQ-3578 SKA1_Low VLBI time stamping**
Each SKA1_Low VLBI data sample shall be directly traceable to the time at the common delay centre of the SKA1_Low telescope, with an accuracy of better than 2 nanoseconds.
- **SKA1-SYS_REQ-3579 SKA1_Low S/N Performance**
The SKA1_Low, when forming VLBI beams, shall have a signal-to-noise performance better than 90% of that achievable by an ideal signal chain, given the same inputs, instrumental calibration and excluding RFI.
- **SKA1-SYS_REQ-3580 SKA1_Low VLBI beams sampling rate**

SKA1_Low, when forming VLBI beams, shall output them with a sampling rate selectable between Nyquist and at least a factor of two oversampling for the selected bandwidth.

- **SKA1-SYS_REQ-3581 SKA1_Low Beamforming weights**
SKA1_Low shall weight the Field Station beams, which are inputs into the VLBI tied-array sums, based on relative sensitivity and coherence losses.
- **SKA1-SYS_REQ-3582 SKA1_Low Configurability**
SKA1_Low, when commanded, shall change the pointing, centre frequency, and bandwidth of each VLBI tied-array beam independently, on scan boundaries.
- **SKA1-SYS_REQ-3583 Independently configurable beams**
SKA1_Low shall provide, through configuration, 1, 2, 3, or 4 separate VLBI specific beams, each with independently selectable centre frequency, bandwidth, frequency resolution and pointing.
- **SKA1-SYS_REQ-3584 SKA1_Low VLBI configurability**
SKA1_Low shall, reconfigure the centre frequency, frequency band, and bandwidth for each VLBI beam, in less than 30 seconds.
- **SKA1-SYS_REQ-3585 SKA1_Low VLBI spectral resolution**
SKA1_Low shall generate VLBI beams with a spectral resolution different from the spectral resolution used for imaging within the same subarray.
- **SKA1-SYS_REQ-3586 SKA1_Low VLBI channel width**
SKA1_Low shall be able to generate VLBI beam data with a selectable channel width of: 256, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2, or 1 MHz TBC.
- **SKA1-SYS_REQ-3587 SKA1_Low VLBI imaging and beamforming**
SKA1_Low shall simultaneously generate both VLBI beams and SKA1_Low imaging data for all polarization products and all baselines (including autocorrelations) with a spectral resolution no worse than 1 MHz, covering at least the larger of 100 MHz TBC or the frequency range(s) covered by the VLBI beam(s) within the associated subarray.
- **SKA1-SYS_REQ-3588 SKA1_Low VLBI out-of-channel rejection**
SKA1_Low shall generate VLBI beams with a transition band that is monotonically decreasing from -3dB at the channel edge, to -60dB at a frequency offset from the centre frequency by the channel bandwidth.
- **SKA1-SYS_REQ-3589 SKA1_Low VLBI beams and subarrays**
SKA1_Low shall be able to allocate individual VLBI beams to different subarrays.
- **SKA1-SYS_REQ-3590 SKA1_Low VLBI reference position**
The SKA1_Low VLBI array phase centre shall be within 100km (TBC) of one of the SKA1_Low stations.
- **SKA1-SYS_REQ-3591 SKA1_Low VLBI: spectral purity**
Spectral distortion, after calibration, for SKA1_Low VLBI shall be below: -30dB in amplitude, 0.01 radians in phase.
- **SKA1-SYS_REQ-3606 SKA1_Low VLBI number of beams**
The SKA1_Low correlator shall have the capability of producing 4 dual polarisation tied-array VLBI beams TBC for one SKA1_Low sub-array.
- **SKA1-SYS_REQ-3607 SKA1_Low VLBI array diameter**
The SKA1_Low correlator shall be capable of forming 4 beams TBC across all stations within the VLBI sub-array to a distance of up to 100,000 TBC metres from the sub-array centre.
- **SKA1-SYS_REQ-3608 SKA1_Low VLBI beam centre frequency**
The SKA1_Low VLBI beams shall have a centre frequency selectable anywhere within the SKA1_Low observing band.
- **SKA1-SYS_REQ-3609 SKA1_Low VLBI beam bandwidth**
The SKA1_Low VLBI beams shall have a contiguous processing bandwidth up to the full bandwidth of the SKA1_Low array.
- **SKA1-SYS_REQ-2968 SKA1_Mid zoom windows**

Maximum zoom window bandwidth: 256 MHz + 35%. Zoom windows configurable: 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 or 1/64. 14000–16384 linearly spaced frequency channels. Dependent on other simultaneous observation allocations.

- Standard imaging: bandwidth 5 GHz
- 1500 pulsar search beams
- 8 pulsar timing beams with 2.4 GHz
- 4 VLBI beams with 2.4 GHz

付録 A. SKA1 局とパートナー局の SEFD

		周波数 [GHz]										
		0.33	0.61	1.0	1.4	1.6	2.3*	5.0	6.0	8.3	23*	43*
アンテナ名	国名	SEFD [Jy]										
SKA1 Core	South Africa	18	7.6	5	5.6	5.7	5.9	7.3	7.8	9.3		
Arecibo 305m	Puerto Rico	12		3	3.5	3	3	5	5	6		
ATCA	Australia											
Cambridge 32m	UK				220	212		136	410		720	
Effelsberg 100m	Germany	600	600	65	20	19	300	20	25	20	70	200
Hartebeesthoek 26m	South Africa					430	410	650	700	630	1800	
JB Lovell 76m	UK	132	83		36	65		80				
JB Mark II 25m	UK				350	320		320	300		910	
Medicina 32m	Italy				490	700	400	170	840	320	700	
Metsähovi 14m	Finland						4500			3200	2608	4500
Nanshan Urumqi 25m	China				300	300	560	250		350	850	
Noto 32m	Italy				820	784	770	260	1100	770	800	900
Onsala 20m	Sweden						1110			785	1200	1310
Onsala 25m	Sweden			900	350	350		480	850			
Parkes	Australia		49	40	31	31	98	61	67	135	116	
Sardinia 64m	Italy				67	67			50		138	
Sheshan 25m	China					670	800	720	1500	800		
Tianma 65m	China				39	39	46	26	26	48	70	120
Toruń 32m	Poland			2000	250	300		220	650		500	
Westerbork 25m	Netherlands	2100		1680	420	560	840	1680	1600	1680		
Wettzell 20m	Germany						1250			750		
Yebes 40m	Spain						1400	160	160	200	200	480
VERA Mizusawa 20m	Japan								2175		2108	4392
VERA Iriki 20m	Japan								2175		2108	4392
VERA Ogasawara 20m	Japan								2175		2108	4392
VERA Ishigaki 20m	Japan								2175		2108	4392
KVN Yonsei 21m	South Korea										1328	1992
KVN Ulsan 21m	South Korea										1328	1992
KVN Tamna 21m	South Korea										1328	1992
Kashima 34m	Japan				200	200	370	700	700	300	990	
Usuda 64m	Japan											
Nobeyama 45m	Japan										285	655
Hitachi 32m	Japan								240	240	800	
Takahagi 32m	Japan								240	240	800	
Yamaguchi 32m	Japan								240	240		
Yamaguchi 34m	Japan								240	240		

*現在の SKA1 計画では実装されない

付録 B. SKA1 局とパートナー局の基線感度(100sec, 100 MHz)

アンテナ名	国名	周波数 [GHz]										
		0.33	0.61	1.0	1.4	1.6	2.3*	5.0	6.0	8.3	23*	43*
感度 [μJy]												
Arecibo 305m	Puerto Rico	104	0	28	31	29	30	43	44	53	0	0
ATCA	Australia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cambridge 32m	UK	0	0	0	248	246	0	223	400	0	1004	0
Effelsberg 100m	Germany	735	477	132	75	74	297	85	99	96	313	1122
Hartebeesthoek 26m	South Africa	0	0	0	0	350	348	487	522	541	1587	0
JB Lovell 76m	UK	345	178	0	100	136	0	171	0	0	0	0
JB Mark II 25m	UK	0	0	0	313	302	0	342	342	0	1129	0
Medicina 32m	Italy	0	0	0	370	447	344	249	572	386	990	0
Metsähovi 14m	Finland	0	0	0	0	0	1152	0	0	1220	1911	5324
Nanshan Urumqi 25m	China	0	0	0	290	292	406	302	0	403	1091	0
Noto 32m	Italy	0	0	0	479	473	477	308	655	598	1058	2381
Onsala 20m	Sweden	0	0	0	0	0	572	0	0	604	1296	2873
Onsala 25m	Sweden	0	0	493	313	316	0	419	576	0	0	0
Parkes	Australia	0	0	140	92	92	88	154	173	154	541	0
Sardinia 64m	Italy	0	0	0	137	138	0	0	140	0	440	0
Sheshan 25m	China	0	0	0	0	437	486	513	765	610	0	0
Tianma 65m	China	0	0	0	104	105	116	97	101	149	313	869
Toruń 32m	Poland	0	0	735	265	292	0	283	503	0	837	0
Westerbork 25m	Netherlands	1375	0	673	343	399	498	783	790	884	0	0
Wettzell 20m	Germany	0	0	0	0	0	607	0	0	591	0	0
Yebes 40m	Spain	0	0	0	0	0	643	242	250	305	529	1739
VERA Mizusawa 20m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	921	0	1718	5260
VERA Iriki 20m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	921	0	1718	5260
VERA Ogasawara 20m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	921	0	1718	5260
VERA Ishigaki 20m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	921	0	1718	5260
KVN Yonsei 21m	South Korea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1364	3543
KVN Ulsan 21m	South Korea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1364	3543
KVN Tamna 21m	South Korea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1364	3543
Kashima 34m	Japan	0	0	0	237	239	330	505	522	373	1177	0
Usuda 64m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nobeyama 45m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	632	2031
Hitachi 32m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	306	334	1058	0
Takahagi 32m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	306	334	1058	0
Yamaguchi 32m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	306	334	0	0
Yamaguchi 34m	Japan	0	0	0	0	0	0	0	306	334	0	0

*現在の SKA1 計画では実装されない

付録 C. SKA1 局とパートナー局の基線長と角度分解能

アンテナ名	基線長 [km]	周波数 [GHz]										
		0.33	0.61	1.0	1.4	1.6	2.3*	5.0	6.0	8.3	23*	43*
アンテナ名	基線長 [km]	分解能 [mas]										
Arecibo 305m	9594.7	19.78	10.54	6.45	4.51	3.87	2.79	1.29	1.07	0.77	0.28	0.15
ATCA	9893.6	19.19	10.22	6.25	4.38	3.75	2.71	1.25	1.04	0.75	0.27	0.15
Cambridge 32m	8574.5	22.14	11.79	7.22	5.05	4.33	3.13	1.44	1.20	0.87	0.31	0.17
Effelsberg 100m	8348.3	22.74	12.11	7.41	5.19	4.45	3.21	1.48	1.24	0.89	0.32	0.17
Hartebeesthoek 26m	814.1	233.17	124.20	76.01	53.19	45.60	32.93	15.20	12.67	9.12	3.29	1.77
JB Lovell 76m	8695.5	21.83	11.63	7.12	4.98	4.27	3.08	1.42	1.19	0.85	0.31	0.17
JB Mark II 25m	8695.2	21.83	11.63	7.12	4.98	4.27	3.08	1.42	1.19	0.85	0.31	0.17
Medicina 32m	7790.8	24.36	12.98	7.94	5.56	4.76	3.44	1.59	1.32	0.95	0.34	0.19
Metsähovi 14m	9053.8	20.97	11.17	6.83	4.78	4.10	2.96	1.37	1.14	0.82	0.30	0.16
Nanshan Urumqi 25m	9656.2	19.66	10.47	6.41	4.48	3.84	2.78	1.28	1.07	0.77	0.28	0.15
Noto 32m	7079.8	26.81	14.28	8.74	6.12	5.24	3.79	1.75	1.46	1.05	0.38	0.20
Onsala 20m	8857.0	21.43	11.42	6.99	4.89	4.19	3.03	1.40	1.16	0.84	0.30	0.16
Onsala 25m	8856.8	21.43	11.42	6.99	4.89	4.19	3.03	1.40	1.16	0.84	0.30	0.16
Parkes	9700.7	19.57	10.42	6.38	4.46	3.83	2.76	1.28	1.06	0.77	0.28	0.15
Sardinia 64m	7377.2	25.73	13.71	8.39	5.87	5.03	3.63	1.68	1.40	1.01	0.36	0.20
Sheshan 25m	10612.9	17.89	9.53	5.83	4.08	3.50	2.53	1.17	0.97	0.70	0.25	0.14
Tianma 65m	10609.7	17.89	9.53	5.83	4.08	3.50	2.53	1.17	0.97	0.70	0.25	0.14
Toruń 32m	8480.4	22.38	11.92	7.30	5.11	4.38	3.16	1.46	1.22	0.88	0.32	0.17
Westerbork 25m	8544.7	22.21	11.83	7.24	5.07	4.34	3.14	1.45	1.21	0.87	0.31	0.17
Wettzell 20m	8176.6	23.21	12.37	7.57	5.30	4.54	3.28	1.51	1.26	0.91	0.33	0.18
Yebes 40m	7706.2	24.63	13.12	8.03	5.62	4.82	3.48	1.61	1.34	0.96	0.35	0.19
VERA Mizusawa 20m	11579.2	16.39	8.73	5.34	3.74	3.21	2.32	1.07	0.89	0.64	0.23	0.12
VERA Iriki 20m	11057.5	17.17	9.14	5.60	3.92	3.36	2.42	1.12	0.93	0.67	0.24	0.13
VERA Ogasawara 20m	11484.1	16.53	8.80	5.39	3.77	3.23	2.33	1.08	0.90	0.65	0.23	0.13
VERA Ishigaki 20m	10597.3	17.91	9.54	5.84	4.09	3.50	2.53	1.17	0.97	0.70	0.25	0.14
KVN Yonsei 21m	11005.3	17.25	9.19	5.62	3.93	3.37	2.44	1.12	0.94	0.67	0.24	0.13
KVN Ulsan 21m	11070.4	17.15	9.13	5.59	3.91	3.35	2.42	1.12	0.93	0.67	0.24	0.13
KVN Tamna 21m	10907.4	17.40	9.27	5.67	3.97	3.40	2.46	1.13	0.95	0.68	0.25	0.13
Kashima 34m	11534.4	16.46	8.77	5.36	3.75	3.22	2.32	1.07	0.89	0.64	0.23	0.13
Usuda 64m	11450.3	16.58	8.83	5.40	3.78	3.24	2.34	1.08	0.90	0.65	0.23	0.13
Nobeyama 45m	11452.4	16.57	8.83	5.40	3.78	3.24	2.34	1.08	0.90	0.65	0.23	0.13
Hitachi 32m	11542.8	16.44	8.76	5.36	3.75	3.22	2.32	1.07	0.89	0.64	0.23	0.13
Takahagi 32m	11542.9	16.44	8.76	5.36	3.75	3.22	2.32	1.07	0.89	0.64	0.23	0.13
Yamaguchi 32m	11147.5	17.03	9.07	5.55	3.88	3.33	2.41	1.11	0.93	0.67	0.24	0.13
Yamaguchi 34m	11147.6	17.03	9.07	5.55	3.88	3.33	2.41	1.11	0.93	0.67	0.24	0.13

*現在の SKA1 計画では実装されない