

SKA エンジニアリングレポート 2021



日本 Square Kilometre Array コンソーシアム

技術検討班

目次

第1章	はじめに	4
1.1	SKA 計画の概要	5
1.2	科学目標に対するシステム要求の概要	7
1.3	日本の立場	12
第2章	AIV/SC	13
2.1	AIV の概要	13
2.2	ロールアウトプラン	13
	著者一覧	19
第3章	ファラデーモグラフィ	20
3.1	ファラデーモグラフィソフトウェアのための要求	20
3.2	ファラデーモグラフィを成功させるための課題・目標	29
3.3	日本の経験（開発・準備状況）と計画	33
	著者一覧	37
第4章	SKA1-LOW EoR パイプライン	38
4.1	LOW & SDP に対する要求	38
4.2	システム要件を満たすための課題・目標	40
4.3	日本の経験（開発・準備状況）と計画	43
	著者一覧	46
第5章	UHF 帯広帯域受信機	47
5.1	UHF 帯観測に関する SKA のデザイン	47
5.2	UHF 帯広帯域観測を達成するための課題と目標	53
5.3	日本の経験（開発・準備状況）と計画	67
	著者一覧	77
第6章	Band-6/Band-7 受信機開発検討	78
6.1	Band 6 受信機	78
	著者一覧	85
第7章	SKA-VLBI	86
7.1	SKA-VLBI システム構成	86
7.2	システム要件を満たすための課題・目標	89
7.3	日本の経験（開発・準備状況）と計画	90
	著者一覧	93

第 8 章 On-the-Fly Interferometry	95
8.1 SKA1 における OtFI 実装に向けた検討	95
8.2 OtFI 実装に向けた課題と目標	95
8.3 日本の経験（開発・準備状況）と計画	96
著者一覧	98
第 9 章 まとめ	99
9.1 おわりに	99
付録 A SKA1 Level0 Science Requirements	100
付録 B SKA1-Low および SKA1-Mid における周波数ごとの感度	103
参考文献	108

第1章 はじめに

執筆: 新沼浩太郎

本文書の目的

国際大型低周波電波干渉計計画”Square Kilometer Array (SKA)”は 1990 年代より実現に向けた議論が行われてきていたが、いよいよ 2021 年 7 月よりフェーズ 1 (以後 SKA1) の建設が本格的に開始された (図 1.0.1 には SKA 望遠鏡群の想像図を示す)。日本においても SKA への参画を目指し、2008 年より日本 SKA コンソーシアム (SKA-JP) を立ち上げ、コミュニティを拡大しながら議論を進めてきた。



図 1.0.1: 天の川を探る SKA の想像図と基地局の想像図。(クレジット : SKAO, [1])

SKA-JP では日本の SKA 参画、そして国際協働の枠組みで科学成果の創出および国際プレゼンスの発揮を目指し、独自の科学検討とそれらをまとめた科学白書 [2] の作成にとどまらず、将来的な SKA へ技術貢献を通じた日本の産業へ技術還元を目指した検討も行ってきた。また、2019 年に国立天文台に発足した SKA1 検討室が中心となり SKA 天文台との議論を重ね、SKA1 建設期に日本として担うことが期待される役割などを通じた参画の方針についても合意が得られつつある。

本文書は、2016 年に発行され広く SKA 計画について技術的観点から紹介しているエンジニアリングブック 2016 とは異なり、日本がどのように参画していくのか? 国際チームで検討が進むテーマだけでなく SKA-JP が提案する独自のサイエンスについても、実現に向けた技術的課題は何であるか? その課題に対して日本の経験でどのような貢献が可能なのか、を具体的に示すことを目的としている。

1.1 SKA 計画の概要

21 世紀の天文学は低周波電波から超高エネルギーガンマ線にわたる幅広い電磁波帯における波長横断にとどまらず、重力波や高エネルギーニュートリノなども含めた観測手法の分野横断で進めていく時代になる。ALMA や超大型の可視/赤外望遠鏡、Cherenkov Telescope Array (CTA)、James Webb Space Telescope (JWST)、Athena などの電磁波帯の大型装置や LIGO/Virgo/KAGRA などの重力波望遠鏡、IceCube や KAMIOKANDE などのニュートリノ望遠鏡が稼働する時代において、マルチメッセンジャー天文学が推進されるとともに、感度・空間・周波数・時間といったパラメータにおけるディスカバリースペースはさらに広がりを見せていくはずである。この新しい天文学研究の時代の始まりにおいて、SKA は他の大型装置と並び重要かつ基本的な望遠鏡となることが期待される。

さらに SKA は科学的な重要性に留まらず、その大規模な開発に伴う雇用の創出と人的資本の発展、技術革新や経済への大きな影響からパブリックインスピレーションに至るまで、真にグローバルかつ社会的な影響を生み出す研究基盤として幅広い波及効果を生み出しうる国際的な大規模プロジェクトである。

SKA ほどの科学的な目標を掲げ、グローバルな視野をもつ野心的なプロジェクトはこれまでほとんど存在しなかった。したがって、SKA を実現するためには非常に多くの専門的技術を有する人材および画期的な技術だけでなく、このような巨大なグローバルプロジェクトを実現していくことのできる管理体制が必要になると思われる。具体的にはイギリス、南アフリカ、オーストラリアの3つのホスト国と15の参加国は地理的に離れているため、SKA の実現にはこれまでに無いような高いレベルでの国際協力が必要であり、そのためには装置や資金、そして人材が国境を超えてスムーズにやりとりできるよう、円滑に進める必要がある。そして、これらを為し得るために、SKA 機構から CERN や ESO と同様に国際条約を経て設立される政府間機構 SKA 天文台へ移行するに至った。



図 1.1.1: 左：オーストラリアにおける先行機 ASKAP を背景にした SKA1-LOW アンテナの想像図。右上はイギリス・マンチェスター郊外のジョドレルバンクに設置された国際 SKA 天文台本館。右下は南アフリカにおける先行機 MeerKAT と並ぶ SKA1-MID アンテナの想像図。(クレジット：SKA Organisation)

SKA 天文台はイギリスに本部を置き、オーストラリア、南アフリカに SKA 望遠鏡を建設し運用するための責任を有する合法的な組織となる (図 1.1.1)。この構想が初めて提案された 2013 年 10 月以降、数年の準備を経て 2019 年 3 月 12 日にイタリア・ローマにおいてオーストラリア、中国、イタリア、オランダ、ポルトガル、南アフリカ、イギリスによって SKA 天文台協約が結ばれてきた。協議を進めていたインドおよびスウェーデンも条約への署名を目指し自国内での調整を進めているところである。また、日本を含む他のメンバー国も出来る限り早い段階で SKA 天文台や SKA1 建設への参加と財政的な貢献を計画しているところである。

1.1.1 建設フェーズへの移行

2021 年 7 月、いよいよ SKA1 の建設フェーズが開始された。最終構成の 10%規模を目指す SKA1 の建設は 50MHz–350MHz 帯の SKA1-LOW、350MHz–15GHz 帯の SKA1-MID とともに AA0.5、AA1、AA2、AA3、AA4 の 5 段階に分けて 8 年間かけて建設が進んでいく予定である。System AIV についても AA1 から本格的に始まり、2025 年末から 2026 年初頭にかけて開始される AA2 では科学評価データについての公開が始まる予定である。また、同時期から初期科学運用が開始される予定である。最終的には 2020 年代末の本格稼働を目指して計画が進んでいく。詳細は第 2 章を参照されたい。

最終構成の残り 90%の実現を目指す第 2 フェーズ (SKA2) については、SKA1 の建設が終了後建設に向けて動き出す予定である。オーストラリアでは SKA1-LOW を展開し、256 台の長波長開口アンテナ (ログペリアンテナ) で構成される基地局を 512 局、合計で約 13 万台段階的に設置していく予定であるが、SKA2 では基地局を増やし、約 50 万台のログペリアンテナの設置を予定している。南アフリカとその周辺国では SKA1-MID を展開する。最終的に Single Pixel Feed を搭載した 133 台の直径 15m オフセットカセグレンアンテナを建設し、64 台の MeerKAT パラボナアンテナと合わせた計 197 台の望遠鏡群での運用を計画している。SKA1-MID の周波数帯については、アンテナ台数を 2,500 台に増やし最大基線 3,000 km にまで分布させるとともに、広視野観測の実現に向け、個々のアンテナへの Phased Array Feed (PAF) の搭載や、パラボラアンテナ群とは別に中間波長高密度開口アンテナ局の設置などの検討が継続している (第 5 章参照)。

一方、まさに桁違いの規模の電波干渉計となる SKA2 の実現には、コスト的な課題に限らず、消費電力やデータ伝送、人工電波干渉対策等々、多くの技術的課題が存在する。SKA1 の建設が始まる段階ではあるが、引き続き上記の課題についての検討を国際的に進めていく必要がある。

1.1.2 科学目標概要

SKA1 の設計は新たに立ち上がりつつあるマルチメッセンジャー天文学時代において第一線で活躍中の観測装置とも相補的であり、また広く科学に革新をもたらす次世代望遠鏡の 1 つとなることが期待されている。また、革新的な他モード同時観測機能の搭載によって、SKA1 は以下に示すような多くの重要な科学的課題に取り組んでいく。

- 中性水素で満ちた初期宇宙においてどのように初代星や初代銀河が形成されていったのか、明らかにする。
- 膨大な数の銀河に対する高感度観測によって、形成初期から今日に至るまでの銀河の進化過程をマッピングする

- アインシュタインの重力理論をブラックホール周辺における強重力場で検証する
- ビッグバンの痕跡となる長周期重力波を検出する
- 宇宙磁場はどのように宇宙を形作っているのかを理解する
- 宇宙における星の形成史を明らかにする
- 原始惑星系円盤の形成初期段階を発見する
- 未知の電波バーストの起源を明らかにする

科学目標の詳細については、2015年にSKA機構が国際版SKAサイエンスブック”Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array”として取りまとめ、刊行している[3]。SKA1でこれらのサイエンスゴールを達成するために必要な装置性能（SKA1: Level0 Science Requirement[4]）がまとめられており、本文書付録Aには優先順位付けされたSKA1の科学目標とそれらを達成するための要求性能の対応表を示している。

一方、SKA-JPの科学検討班においても、SKA1を用いた独自の科学検討を進め、2020年に日本版サイエンスブックの第2版[2]を刊行している。日本語版サイエンスブックにおいては上記の各項目に関する国際的な枠組みでの検討内容に限らず、日本独自の多様な科学提案も多く記されている。

1.2 科学目標に対するシステム要求の概要

SKA1における科学目標を達成するための要求（SKA1 Level0 Science Requirement[4]）に基づいて、それらを実現するためのシステム要求（SKA1: Level1 System Requirement[5]）がまとめられている。システム要求文書[5]において、科学要求との対応を「SKA1-SYS_REQ-REQ-****」のように表記している（ここで“*”には数値が入る）。ここでは、SKA1-LowおよびSKA1-Midで期待される性能や観測モードについて簡単に述べる。また、観測が実行された場合にユーザーがデータへアクセスするために必要不可欠な科学地域センター（Science Regional Center: SRC）についても意義および機能についてまとめる。

1.2.1 SKA1-Low

SKA1-Lowは観測周波数50MHz-350MHzをカバーするログペリアンテナ全13万素子以上で構成される観測モードである。256素子からなるステーションが全部で512ほど西オーストラリアの砂漠地帯に展開される。およそ半数のステーションが中心から半径およそ2km以内に密に配置され、残りは最長基線65kmに広がるスパイラルアーム状に疎に配置される。

同周波数帯を観測可能な既存の電波干渉計（先行機含む）に比べ10倍高い感度と、100倍を超えるサーベイスピードの向上が期待される[6]。観測周波数毎に期待される感度については付録Bの表B.0.1にまとめている。また、同時に500の独立な合成ビームを用いたパルサーサーチモード（SKA1-SYS_REQ-2894）や16ビーム同時にパルサータイミング実施可能なモード（SKA1-SYS_REQ-3202）、最大4本のVLBI観測用ビームの出力（SKA1-SYS_REQ-3583）、など高い分解能で同時に多視野を監視可能なシステムが実装される予定である。表1.2.1にはSKA1-Lowに求められている詳細な性能をまとめている。

表 1.2.1: SKA1-Low で要求される性能 [7]。

Aperture Arrays		
Lower Frequency	50 MHz	Each antenna element covering full range
Upper Frequency	350 MHz	Dual pol'n
Number of antennas per station	256	Log-Periodic-Dipole antennas
Station Effective Diameter*	38 m	
Number of stations	512	
Total physical aperture	5.8 x 10 ⁵ m ²	
Dense/Sparse Transition**	~94 MHz	
Array Configuration		
Core (radius <500 m)	224 stations	See Figure
Inner (radius <1700 m)	278 stations	"
Spiral Arms	234 stations	"
Station Beam Forming		
Number of beams***	1 – 384	Each with dual polarisation.
Max. bandwidth per beam	300 MHz	Each polarisation.
Max. no. of antennas per beam	256	
Signal Processing System		
Max. no. frequency channels	55296	
Standard Frequency Resolution	5.4 kHz	300 MHz/55296 = 5.4 kHz
Max. Frequency Resolution	226 Hz	Zoom mode
Complex Correlations****	2.9 x 10 ¹⁰	(512-513/2) baselines x (1) beams x 4 pol'n prod's x 55296 chans
Integration Time	0.9 s	Reduceable to 0.3 s for a limited number of sub-stations
Array Beam Former		
Full beamformer	512 stations	
Within 20-km Array Diameter	404 stations	
Maximum number of beams		
Pulsar Search	500	Independently steerable; 2 pol'n
Pulsar Timing	16	"
VLBI	4	"
Max. Total Bandwidth		
Pulsar Search	118 MHz	Per beam; 2 pol'n
Pulsar Timing	300	"
VLBI	300	"

1.2.2 SKA1-Mid

SKA1-Mid は南アフリカ北ケープ州の Karoo サイトに、最終的には直径 15m のオフセットカセグレン型アンテナ 133 台と直径 13.5m の MeerKAT アンテナ 64 台の計 197 台からなり、最大基線長 150km にわたりこれらが配列される電波干渉計となる。SKA1-Low の観測周波数上限以上の周波数帯を Band1: 0.35GHz-1.05GHz、Band2: 0.95GHz-1.76GHz、Band3: 1.65GHz-3.05GHz、Band4: 2.80GHz-5.18GHz、Band5a: 4.60GHz-8.50GHz、Band5b: 8.30GHz-15.30GHz、Band5c: 15.0-26GHz の複数バンドに分割しシステムが構成されている¹。

SKA1-Mid についても、特に 1GHz 付近においては同周波数帯を観測可能な既存の電波干渉計に比べおよそ 10 倍高い感度と、100 倍を超えるサーベイスピードの向上が期待され、2030 年代にかけて非常に強力な電波望遠鏡になるはずである [6]。観測周波数毎に期待される感度については付録 B の表 B.0.2 にまとめている。また、同時に 1500 の独立な合成ビームを用いたパルサーサーチモード (SKA1-SYS_REQ-2203) や 16 ビーム同時にパルサータイミング実施可能なモード

¹ただし、Band3/4/5c の搭載時期については未定である。

(SKA1-SYS_REQ-3201)、少なくとも 4 本の独立な VLBI 観測用ビームの出力 (SKA1-SYS_REQ-2853)、など高い分解能で同時に多視野を監視可能なシステムが実装される予定である。表 1.2.2 には SKA1-Mid に求められている詳細な性能をまとめている。

表 1.2.2: SKA1-Mid で要求される性能 [7]。

Aperture	m ²	133 x 15-m (equiv. dia.) offset Gregorian reflectors Plus 64 x 13.5-m (equiv. dia.) offset Gregorian reflectors
Total physical aperture	33306	
Total Available aperture	31641	Availability 95%
Minimum Elevation Angle	15 deg	All Azimuths – 270° wrap
Array Configuration	Antenna	Filling factor %
radius <~400 m	80 (41%)	2.67
~400 m < radius < ~1000 m	35 (18%)	0.22
~1000 m < radius < 2500 m	23 (12%)	0.023
~2500 m < radius < 4000 m	13 (6.6%)	7.04E-03
~4000 m < radius < 10000 m	13(6.6%)	8.53E-04
10000 m < radius < 30000 m	15 (7.6%)	1.05E-04
~30000 m < radius < 100000 m	18 (9.1%)	1.11E-05
Antenna RF System		
Frequency Range	GHz	
Band 1 (high) + UHF Band	0.58 – 1.015	Dual pol'n. Shared Frequency Range
Band 2 + L-band	0.95 – 1.67	"
Band 3 <i>Note 1</i>	1.65 – 3.05	Dual pol'n. SKA antennas only
Band 4 <i>Note 1</i>	2.80 – 5.18	"
Band 5a	4.60 – 8.50	"
Band 5b	8.30 – 15.4	"
Band 5c <i>Note 1</i>	15.0 – 26	"
Continuum Sensitivity		
SEFD (available antennas, Stokes I)	Jy	Equivalent A _e /T _{sys} (m ² /K)
Band 1 (high) + UHF Band	2.85	967
Band 2 + L-band	1.55	1784
Band 3	2.50	1102
Band 4	3.49	792
Band 5a	2.38	1161 (Max. Sampled Bandwidth 2 x 2.5 GHz)
Band 5b	2.77	998 (Max. Sampled Bandwidth 2 x 2.5 GHz)
Min. detectable flux (rms) (ΔS _{min})	μJy s ^{-1/2}	
Band 1 (high) + UHF Band	99.8	Average over RF bands
Band 2 + L-band	42.1	"
Band 3	48.9	"
Band 4	53.1	"
Band 5a	25.3	"
Band 5b	29.4	"

1.2.3 SRC

SKA1 では、アーカイブデータだけでなく自身が提案した観測であっても得られたデータにアクセスするためにも、SRC を介さなければならない。SRC の機能は大きく分けて

- サイエンスデータの生成

表 1.2.2: SKA1-Mid で要求される性能 (続き) [7]。

Signal Processing System		
Correlator		
Freq. chans (widest sampled BW)	65536	
Full Bandwidth Velocity Resolution	km-s ⁻¹	
Band 1 (high) + UHF Band	~5	Non-Zoom, all available frequency channels
Band 2 + L-band	~5	"
Max. Frequency Resolution	0.21 kHz	13.440 · 2 ⁻ⁿ n ∈ (0, ..., 6) kHz in Zoom mode
Standard Frequency Resolution	13.44 kHz	220.200960 / 16384
Complex Correlations	5.1 x 10 ⁹	(197 ² /2) baselines x 4 pol'n prod's x 65536 chans
Minimum Integration Time	0.14 s	Interface Control Document
Transient Capture Buffer Size	72 – 288 s	For 330 MHz BW, scaling with 2-8 bits sample width
Pulsar Search Array Beam Former		
Full beamformer	197 antennas	Any Front-end band.
No. Antennas in 20 km array diameter	164	Typical Beam-forming Sub-array
Available Bandwidth	300 MHz	Each polarisation
Beam Area at 1 GHz	12.7 arcsec ²	$\pi/4(1.3 \lambda_{1\text{GHz}} / D_{\text{array}})^2$ 13 arcsec
Available No. of IQUV Stokes power beams	1500	Pol'n corrected on output.
Available No. of Frequency Channels	3720	Resolution 80.64 kHz
Channel tuning resolution	1.26 kHz	
Impulse Response Bands 1-3	30 dB/sample	Decay rate with no oversampling
Impulse Response Bands 4-5	40 dB/sample	"
Pulsar Timing Array Beam Former		
Full beamformer	197 antennas	Any Front-end band.
Available number of 'voltage' beams	16	
Available Total Bandwidth	20 GHz	Each pol'n; aggregate over 16 beams
Available No. dual pol'n Freq. Chans.	3720	Resolution 53.76 kHz
Impulse Response Bands 1-3	30 dB/sample	Decay rate with no over-sampling
Impulse Response Bands 4-5	40 dB/sample	"
VLBI Beam Former		
Full beamformer	197 antennas	Any Front-end band.
Available Bandwidth	2 x 2.5 GHz	Per beam; 2 pol'n; Band 5, full BW for other bands.
Available No. of real-valued voltage beams	4	Pol'n corrected on output.
No. of frequency-chan bandwidths	9	1, 2, 8, 16, 32, 64, 128, 224 MHz

- 計算機リソースの提供
- 地域ごとのユーザーサポート
- 世界各地で分担し 1 つの SRC ネットワークを構成²

となる。

現在、国立天文台 SKA1 検討室を中心に SRC への人的・財政的貢献の方法について検討中である。基本的に SRC への貢献は SKA 本体への貢献とは独立なものであると見なされるため、SRC への貢献割合が SKA1 への貢献割合としては考慮されない。一方、SRC への貢献をしなかった場合、日本のユーザーが SRC 経由でデータへのアクセスはできたとしても、その他の重要なリソース（計算機やユーザーサポート）を利用できない可能性がある。

SRC への貢献方法として、日本独自で SRC ネットワークへ貢献する方法、あるいは他国（例えば上海）の構築する SRC ネットワークへの人的・財政的貢献をする、などが考えられる。前者で

²それぞれが同じ機能を有する ALMA 地域センター (ARC) とは異なるポリシーである。

あれば、日本独自の機能を持たせることが可能となるとともに、SRC ネットワークへの日本の希望が反映できる可能性もある。後者の場合は、限られたリソースでも SRC ネットワークへ参加できる可能性があるものの、主導する国の状況に大きく依存する可能性もある。

1.3 日本の立場

すでに述べたとおり、2016年版のエンジニアリングレポートとは異なり、本文書ではSKA1に限らず、将来的なSKA2への拡大も見据え、ソフト・ハード両面で日本が大きく貢献できる開発項目に特化してまとめることを目的としている。また、これらの開発項目は日本の提案する独自のサイエンステーマとも密接に関わっており、国際的な大規模プロジェクトにおいて日本の強みを十分に発揮できるものである。

1.3.1 日本の開発：現状およびSKAへの応用

SKA-JP技術検討班において、SKA1を用いて日本が国際的に競争力のある研究を展開可能なテーマとそれに深く関わり日本がリードできる（あるいはリードしている）開発項目、日本の経験と技術的強みが活かせる将来的にSKAプロジェクト全体に資するだけでなく日本への技術的財産・経験の蓄積が期待できる開発項目、としてAIV/SC（第2章）、ファラデーモグラフィ（第3章）、SKA1-LOW EoRパイプライン（第4章）、UHF帯広帯域受信機（第5章）、Band-6/Band-7受信機（第6章）、SKA-VLBI（第7章）、On-the-Fly Interferometry（第8章）の7項目を掲げそれぞれの項目ごとに検討班を設置し検討を進めてきた。

上記7つの項目のうち、AIV/SC、ファラデーモグラフィ、SKA1-LOW EoRパイプライン、の3項目についてはSKA1の建設フェーズからの貢献を視野に入れた検討項目である。一方、残りの4項目についてはSKA1における初期フェーズからの搭載は予定されておらず、建設と並行してSKA Observatory Development Program (SODP)の枠組みでの検討、あるいはSKA2を含めた将来の新たな機能としての開発を見越した検討項目である。

それぞれの章の構成は、大きく1. 取り上げる項目とSKA1システムに対する要求との関係、2. 各項目実現するための課題と目標、3. 日本の経験（開発・準備状況）と計画、の3つに分かれている。

1.3.2 開発による波及効果

技術検討班において検討したハードウェアおよびソフトウェアにおける開発項目は、SKAへの貢献およびそれに伴う国際プレゼンスの発揮はもちろんのこと、この経験を通じた人材育成および日本の新たな技術の獲得という意味で大きな波及効果が期待できる。

AIVにおける経験は国際的な大型電波干渉計の立ち上げを通して、国際的な視点から全体を俯瞰できる人材の育成に繋がるとともに、従来に無い規模の観測装置における高ダイナミックレンジ/広視野イメージ機能の評価方法の確立（開発）などの経験を日本が獲得することに繋がる。そしてこれらの経験はngVLAやSKA2、eALMAなどの計画の実現に向けて日本が活躍の場を獲得することにも繋がっていく。また、例えば受信機開発についてはこれまで日本で培ってきた開発経験をベースにSKAへ貢献することができ、次世代の受信機開発をリードしていくことができる人材の育成および将来の国際協力に向けた実績の獲得が可能となる。そしてこれらの取り組みは国内の新望遠鏡や東アジアの電波望遠鏡にも展開でき、国内アレイの底上げや東アジアアレイの強化、そしてSKA-VLBIをコアとしたグローバルVLBIの発展へと繋がっていく。

第2章 AIV/SC

執筆: AIV/SC 検討 WG

2.1 AIV の概要

AIV は Assembly Integration Verification の略で、SKA 望遠鏡の組立・統合・評価活動を示す。

組立 (Assembly) は各コンポーネント契約者が設計製造したコンポーネントを、サイト等に設置し組み込む作業を示す。

統合 (Integration) はサイト等に置かれたコンポーネントを稼働させ、それぞれのインターフェイスを確立させる作業を示す。

評価 (Verification) は統合されたコンポーネントを用いて、システムとしての評価試験を行う作業を示す。

AIV で実施されるシステムとしての評価試験とは、システムの SKA 計画が定めたレベル 1 (L1) 要求に対しての評価試験である。

SKA 計画の要求は、階層構造をもつ複数の要求からなる。最上位層にレベル 0 (L0) 要求がある。これはサイエンス要求と言われ SKA が実現すべきサイエンスについて記述されている。L0 の下の階層にレベル 1 (L1) 要求がある。これはシステム要求と言われ、サイエンス要求を満たすためのシステムの要求が記述されている。

L1 の下の階層にレベル 2 (L2) 要求がある。これはエレメント要求と言われ、システム要求を満たすためのエレメントの要求が記述されている。エレメントとは、複数のコンポーネントをグループ化したものである (例えば、CSP エレメントとは、CBF(Central Beam Former)、PST(Pulsar Timing)、PSS (Pulsar Search) と CSP-LMC (Local Monitor and Control) のプロダクトから構成される)。

L2 の下の階層にレベル 3 (L3) 要求がある。これは各プロダクトが満たすべき要求である。

そして評価試験では L3 に相当するプロダクト評価試験に始まり、L2 のエレメント評価試験、L1 のシステム評価試験、L0 のサイエンス評価試験と推移する。これらの要求の階層構造とそれに沿った評価試験は V 型モデルと言われる (図 2.1.1)。

AIV の組立・統合・評価の活動にはエンジニアリング活動だけでなくサイエンスコミッションング (Science Commissioning, SC) と言われるサイエンス観測機能を立ち上げる活動を含む。エンジニアリング AIV と SC はオーバーラップしており、AIV と SC は協力シタレーションを繰り返しながら進められることになる。一方 Science Verification (SV) は L0 要求を満たしているかを評価する作業であり AIV には含まれない。

2.2 ロールアウトプラン

AIV の活動は、建設の進展に合わせて進められる。

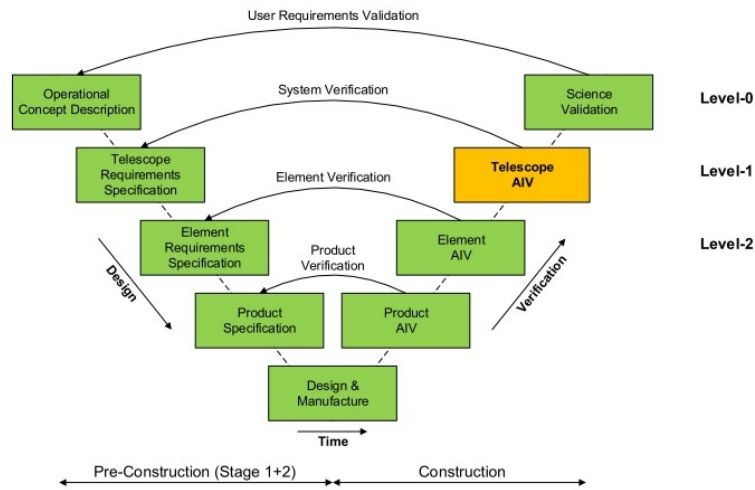


図 2.1.1: SKA 計画における V 型評価試験モデル [8]

SKA 望遠鏡の建設は、局数や観測機能が複数のフェイズに分け段階的に増加していく。それぞれのフェイズは、System ITF(Integration Test Facility), AA 0.5(Array Assembly 0.5), AA1, AA2, AA3, AA4 と名づけられている。それらのフェイズの計画をロールアウトプランと言われる。

ITF と AA0.5 から AA4 までの局数の展開を表 2.2.1 に示す。それぞれのフェイズで観測モードがロールアウトされることになる。それぞれエンジニアリングゴールが定められ、それに基づきテストイベントグループ分けされたテストが行われ、そのテスト手順書が準備されている。図 2.2.2, 2.2.3 に AA0.5 から AA4 までの観測モードの展開について示す ([9], [10])。

表 2.2.1: ステーション・ディッシュ数の推移

	AA0.5	AA1	AA2	AA3	AA4
LOW ステーション数	6	18	64	256	512
MID ディッシュ数	4	8	64	128	197
MID に統合される MeerKAT ディッシュ数	0	0	0	8	84

2.2.1 システム ITF

システム ITF は LOW はオーストラリア西岸の Geladton、MID は南アフリカの Capetown に建設される。システム ITF では ITF-QE (Qualification Event) と言われる評価試験と、AA1 から AA4 まで期間にわたってプロダクトがサイトで稼働する前に試験が行われる。プロダクトがサイトに搬入される前に試験ができ、活動環境が厳しいサイトでの評価作業を減らすことができる。基本的に ITF ではデジタルコンポーネントの評価を行うことを目的としており、RF コンポーネントの試験機能は持たない。また周波数標準もルビジウム時計をリファレンスとしており、干渉計のコヒーレンス評価を目的とした試験などは困難である。アナログコンポーネントはデジタイザ周辺から SDP までをスコープとする。LOW と MID それぞれの ITF-QE のブロック図を図 2.2.1 に示

表 2.2.2: LOW 観測モードの推移

	Stations	Imaging	PST	PSS	Transient Buf	VLBI
AA0.5	6	BW75MHz 16k ch				
AA1	18	BW75MHz 16k ch				
AA2	64	BW75MHz partial zoom mode	4 beams			
AA3	256	BW150MHz partial zoom mode	8 beams	125 beams	Full	
AA4	512 full zoom mode	BW300MHz	16 beams	500 beams	Full	Full

表 2.2.3: MID 観測モードの推移。ここでカッコ内は部分的・目標を示す。

	Dishes	Band	Imaging	PST	PSS	Transient Buf	VLBI
AA0.5	4	Band1+2 (+5)	BW800MHz 16k ch				
AA1	8	Band1+2 (+5)	BW800MHz 16k ch	1 beam			
AA2	64	Band1+2 (+5)	BW800MHz 16k ch	6 beams	16 beams		
AA3	121 MK8	Band1+2 (+5)	BW5.2GHz 16k ch	16 beams	128 beams		
AA4	197 MK all	Band1+2+5	BW Full 64k ch	16 beams	1500 beams	Full	4 beams

す。AA0.5 以降においては、新規に開発されたハードウェアの試験と、ITF にテスト用に設置されたハードウェアを用いて新規に開発及び改修されたソフトウェアの試験が行われる。

2.2.2 AA0.5

AA0.5 は 2019 年後半にロールアウトプランに組み込まれた新たなアレイアセンブリで、それ以前 AIV ワークパッケージコンソーシアムによる計画では AA は AA1 から AA4 までであった。AA0.5 はプロダクションが行われる前の先行活動として提案されたもので、AA1 のアンテナ、ステーションの一部と観測機能を一部だけを先行製造しサイトにて電波干渉計としての試験を行う。AA0.5 で性能を評価し、Product Readiness Review (PRR) を行うことで製造開始後のプロダクトの不具合が発生するリスクを減少させることができる。AA0.5 の組立・統合・評価は AIV の活動の範囲に含まれる。

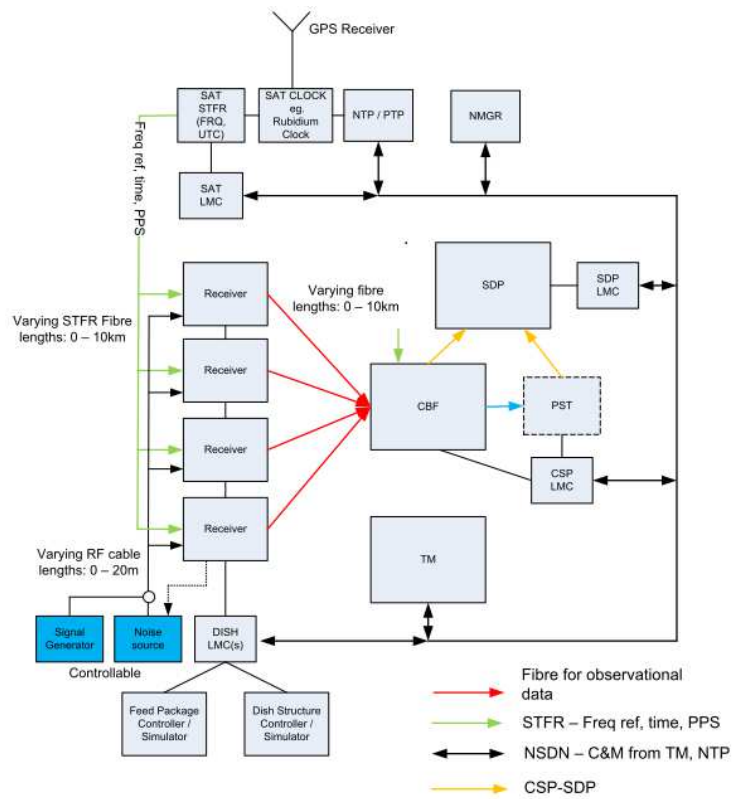


図 2.2.1: MID ITF ブロック図

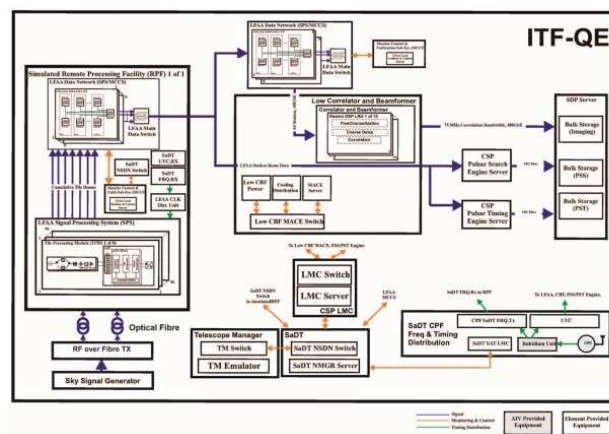


図 2.2.2: LOW ITF ブロック図

2.2.3 AA1 から AA4

AA1 から AA4 まではサイトに建設される。それぞれの期間はほぼ 1 年である。

AA 初期には、インフラの整備も途中でかつ局数も少ないため一時的な施設などが用いられる。LOW では、AA1 までは CSP と SDP の設置場所は Remote Processing Facility (RPF) となる。CSP は pre product とされる試験機が用いられる。RPF を用いることで最終的に CSP と SDP が設置される CPF (Central Processing Facility) が建設される前に AA の試験が可能となる。またインフラが整備される前のサイトにおいて道路のアクセスも良いところに RPF を設けられるため作業効率も向上させることができる。AA2 からは CSP や SDP などは Perth に建設された SPF (Science Processing Facility) に設置され、最終バージョンのプロダクトが設置される。

MID では CSP は既存の KAPB (Karoo Array Processor Building) に置かれるため、LOW のような RPF は必要としない。また SDP も AA1 までは本来設置される Capetown でなく KAPB に設置される。AA2 からは CSP や SDP などは Cape Town に建設された SPF (Science Processing Facility) に設置され、最終バージョンのプロダクトが設置される。

2.2.4 SKAJP 参加の計画

SKAJP のコミュニティチームは AIV 活動での SKA 計画への参入を検討している。AIV へ参加は建設スケジュールにそって活動内容が変化しながら展開される。それらは建設以前、アレイアセンブリ開始前、アレイアセンブリ開始後の 3 つのフェイズに分けられる。本節では、それぞれのフェイズに置いて SKAJP のコミュニティチームが参加した場合の予想される AIV 活動について述べる。

建設以前

建設以前では AIV 計画立案作業とプロトタイプ開発が行われる。

計画の立案では、効率よく AIV 作業を進めるためにプロダクトのデリバリスケジュールをもとに試験の順序を組み立てる。特にこれにはハードウェアとソフトウェアと試験装置のロールアウトが同期することが重要である。ソフトウェアは Git レポジトリを通じて世界中の SKA 関連ソフトウェア開発者が開発していて Control Architecture team に調整を行い進めることが求められる。

プロトタイプの AIV 試験は Prototype System Integration (PSI) と言われ CSP エレメントのインテグレーションファシリティで行われる。LOW はオーストラリアで、MID はカナダを予定している。試験は多くのインターフェイスを持つ CSP が中心的なコンポーネントとなり、インターフェイス等を評価する。また AIV の作業は Tier1 コントラクターと協調し進める。

この PSI では、プロダクトのプロトタイプ試験だけでなくテストシステムのプロトタイプ試験であることも重要な観点である。SKA ではテストフレームワークに BDD (Behavior Driven Development) を採用した。テストツールは pytest-bdd である。このツールはテストシナリオと実装される python で書かれたテストコードを分離されている。分離することでテストシナリオをテストコードがそれぞれ独立に再利用でき汎用性が高まる。テストシナリオは Gharkin と言われる自然言語のスク립トで記述される。テストシナリオには、テストの前提条件、テストの実行手順、予想される結果などが記述される。複数の条件を同時に扱え、同じテストを同じ条件で実施できるメリットがある。また自然言語スク립トは python プログラマでなくても可読性が高く、多様なスキルを持つテスターの間で確実にテストシナリオを共有することができる。またシナリオとテスト結果は、

SKA のプロジェクトマネジメントクラウドシステム JIRA[®] の拡張モジュール JIRA/X-RAY[®] で管理され、開発者全員に情報共有される。このテストフレームワークの採用は、多様なスキルを持ったメンバーで情報を共有しつつ、明確な条件と手順で再現性のあるテストが可能となり、国際的な共同開発であり長期の運用が見込まれる SKA に非常に適している。

SKAJP のコミュニティチームが AIV に参入した場合には、テスト主な活動になるため、BDD テストフレームワークを瞬時に習得しテストを進めることが重要となる。LOWPSI では SKAJP のコミュニティチームがすでに一部 IRA/X-RAY[®] と pytest-bdd のテストが立ち上げに参加している。

ITF 開始後

アレイアセンブリ以前は前述したように ITF でのデジタルデバイスを中心とした試験が行われる。プロダクトが初めてシステムに組み込まれ、他のプロダクトとのインターフェイス試験を中心に機能確認が進められる。最終的には、ITF に組み込まれたすべてのプロダクトを用いた End-to-End の試験を行う。サンプルにテスト用アナログ信号を注入し CSP で処理を行い、SDP に接続する。一部 L1 要求の試験が可能となる。

これらはこれまで国内 VLBI アレイや東アジア関連器の開発してきた知見を活かすことができる。よってこれらの活動は関連器開発に実績のあるメンバーが中心となる。この ITF の活動から MID は南アフリカ、LOW はオーストラリアでの活動が本格的にスタートする。また作業は試験システムの構築と実施の 2 チームに分けられ、MID と LOW それぞれサイトに派遣される。また国内で実施可能な一部の作業は国内チームによって支援される。

アレイアセンブリ開始後

AA0.5 が開始されるフェイズになると事前に立案された計画に沿って AIV 作業を進める。AA0.5 は特に最初のサイトでの活動で、PRR という非常に重要なマイルストーンを含むため特に重要である。

また AA0.5 からはまずプロダクトのハンドオーバーの手続きが必要となり、これらの手順書の確立にも参画する。MID は DISH の、LOW は LFAA のインテグレータからの引き渡しとなり、PSI のスコープ外のコンポーネントをハンドオーバーするため引き渡し条件に多くの作業が必要となる。

AA0.5 ののちに PRR が行われプロダクトの製造が開始される。PRR ののち ITF-QE が、ITF で行われる現在テストの分担などの検討が進められているが、役割分担と責任の範囲を明確にしつつも AIV チームとして Tier1 コントラクターと強調し作業を進める。

著者一覧（○は編集責任者）

○河野裕介	国立天文台
AIV-SC サブワーキンググループ	SKA-JP/EWG

第3章 ファラデートモグラフィ

執筆: ファラデートモグラフィ検討WG

3.1 ファラデートモグラフィソフトウェアのための要求

この節ではLOWまたはMIDのSDP(またはSRC)に関する技術要求をまとめる。ファラデートモグラフィはソフトウェアであるので、SDPまたはSRCに実装されるべきファラデートモグラフィのソフトウェアのために求める技術要求をまとめる。まとめるにあたって、まずファラデートモグラフィの原理を簡単にまとめ、用語を定義する。

3.1.1 ファラデートモグラフィ

ファラデートモグラフィは視線上の磁場構造を推定する新しい手法として世界的に注目されている。観測量である直線偏波強度 $P(\lambda^2)$ は $F(\phi)$ という関数を用いて

$$P(\lambda^2) = Q + iU = \int_{-\infty}^{\infty} F(\phi) e^{2i\phi\lambda^2} d\phi \quad (3.1.1)$$

のように記述できる [11, 12]。ここで λ は偏波の波長 (m) である。 $F(\phi)$ はファラデー分散関数 (Faraday Dispersion Function ; FDF) またはファラデースペクトルと呼ばれ、 ϕ 空間での偏波強度分布を表している。 Q, U は特性ストークスパラメータ、 ϕ はファラデー深度と呼ばれ、

$$\phi \text{ (rad m}^{-2}\text{)} = 0.8119 \int \left(\frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{B_{\parallel}}{\mu\text{G}} \right) \left(\frac{dr}{\text{pc}} \right) \quad (3.1.2)$$

のように記述できる。 n_e は自由電子密度、 B_{\parallel} は磁場の視線に平行な成分、 r は視線距離である。積分は観測者に向けてなされ、磁場が観測者を向いている場合、 ϕ は正值と定義される。 $P(\lambda^2)$ の式を見ると、 ϕ と λ^2 を共役変数とするフーリエ変換の形になっていることが分かる。ゆえに逆変換

$$F(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (3.1.3)$$

によって観測量 $P(\lambda^2)$ から $F(\phi)$ を推定できる。これをRM synthesisと呼ぶ。もしファラデー深度の視線分布が物理距離に対して単調であれば、偏波源や磁場の視線方向の情報を手に入れることができる。また、2次元のイメージングと合わせれば、天体の磁場の3次元構造の解析が可能になる。

一方で、現実には λ^2 空間の全ての点を観測することが不可能であるため、逆変換によるファラデースペクトルの推定は不完全なものとなる。観測可能波長の偏波強度だけで再構築されるファラデースペクトル $\tilde{F}(\phi)$ は、窓関数 $W(\lambda^2)$ を用いて

$$\tilde{F}(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (3.1.4)$$

のように書ける。この式はさらに畳込みの定理を用いて、

$$\tilde{F}(\phi) = K^{-1}R(\phi) * F(\phi) \quad (3.1.5)$$

$$R(\phi) = K \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (3.1.6)$$

$$K = \left[\int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) d\lambda^2 \right]^{-1} \quad (3.1.7)$$

と書ける。これはつまり、再構築されるファラデースペクトルの品質は $R(\phi)$ の品質で定まっていることを示している。この $R(\phi)$ は回転測定波及関数 (RMSF) と呼ばれる。 $R(\phi)/K$ がデルタ関数 $\delta(\phi)$ であれば完全な再構築になるが、現実には起こりえない。

再構築される $F(\phi)$ の ϕ における分解能としては、RMSF の半値幅 (FWHM) が目安となる。例として窓関数が観測可能な波長帯 ($\lambda_{\min}^2 \leq \lambda^2 \leq \lambda_{\max}^2$) で $W(\lambda^2) = 1$ 、その他で 0 の値をとる場合、RMSF の FWHM は

$$\text{FWHM (rad m}^{-2}\text{)} = \frac{2\sqrt{3}}{\lambda_{\max}^2 - \lambda_{\min}^2} \quad (3.1.8)$$

と書け、波長 2 乗空間の範囲が ϕ 分解能を決めていることが分かる。特に長波長側の観測帯域を増やすと、効果的に積分範囲が拡大し ϕ 分解能が向上する。一方で、長波長にいくと偏波解消が無視できなくなる。偏波解消が強くなる目安は偏波角が π だけ回転する ϕ と波長の関係に他ならないので、観測可能な最大の ϕ 構造は次のように書ける。

$$L_{\phi, \max} \text{ (rad m}^{-2}\text{)} = \frac{\pi}{\lambda_{\min}^2 \text{ (m}^2\text{)}} \quad (3.1.9)$$

また、観測できる最大の ϕ は次のように書ける。

$$\phi_{\max} \text{ (rad m}^{-2}\text{)} = \frac{\sqrt{3}}{\delta\lambda^2} \quad (3.1.10)$$

$\delta\lambda^2$ は波長の二乗空間におけるチャンネル幅である。効果的にトモグラフィーをするにはこれら 2 つの制限 (観測帯域、チャンネル数) を同時に改善する必要がある。

3.1.2 ファラデートモグラフィーの手法

前節で、逆変換による $F(\phi)$ の推定は不完全であり、再構築されるファラデースペクトルの品質は $R(\phi)$ によって決まることを説明した。しかし、その逆変換による情報劣化を回復するための様々な方法が考案されている。

RM CLEAN

RM CLEAN は、不完全な $F(\phi)$ のサイドローブを除去し、メインピークを明瞭にする手法である [13, 14]。原理は電波干渉計における像合成での Högbom 型 CLEAN と同じである。 $F(\phi)$ から点源の効果 ($R(\phi)$) を繰り返し差し引いていき、それと同時に clean component と $R(\phi)$ の FWHM の幅を持った合成ビームを畳み込むことで CLEAN した $F(\phi)$ を作っていく。これらの操作を規定の回数もしくは残差がしきい値になるまで繰り返す。しきい値は $F(\phi)$ のノイズレベルで決定する。

QU-fitting

QU-fitting は、観測量である偏波スペクトルからの不完全なフーリエ変換を行わずに、モデルフィットによって $F(\phi)$ を構築する手法である [15, 16, 17]。QU-fitting は 1) $F(\phi)$ モデルの仮定、2) モデルパラメーターの推定、3) 最適なモデルの選択、の3つの行程から成る。1) については、数学的にフーリエ変換が可能である関数 (デルタ関数、ガウシアン、トップハットなど) を ϕ 空間上で仮定することが一般的である。これは数値的なフーリエ変換を避け、計算の高速化を狙う目的がある。関数の形や数は単純な逆変換や RM CLEAN の結果から推察する。2) については Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 法や Nested Sampling 法が主に用いられている。3) については、Akaike Information Criterion (AIC)、Bayesian Information Criterion (BIC)、Bayesian evidence などの情報量基準を用いたモデル選択を行う。これらは、データとモデルの適合度、および、モデルのシンプルさをバランスよく評価する指標であり、これらの値が最小となるモデルを最適なモデルとして採用する。

スパースモデリング

スパースモデリングとは、劣決定問題を解く際に解の要素がほぼ 0 である (この性質をスパース性と呼ぶ) ことを仮定することで、解の推定を行う手法である。これを $F(\phi)$ の再構築に応用する [18, 19, 20]。一般に、観測される偏波スペクトルのチャンネル数よりも求めたい $F(\phi)$ の要素数が多いので、ファラデートモグラフィは劣決定問題である。そのような時に求めたい $F(\phi)$ にスパース性が仮定できれば、カイ二乗値と我々が与えるいくつかの制約が最小となる問題を解くことで $F(\phi)$ を推定できる。我々は、 ℓ_1 ノルム制約項と Total Square Variation (TSV) 制約項と呼ばれる二つの制約を同時にかけるアプローチを提案し、この手法が上手く働くことを確認した [20]。 ℓ_1 ノルム制約では解のスパースさに制約をかけ、TSV 制約では解の滑らかさに制約をかける。そして、交差検証 (cross validation, CV) によって二つの制約の度合いを調節する。

CRAFT

CRAFT (Constraining and Restoring iterative Algorithm for Faraday Tomography, 視線磁場断層解析の反復型制限式復元法) は、Cooray et al. (2021a) [21] により発案された新しいファラデートモグラフィの手法である。このモデルに依存しない反復型のアルゴリズムは、計算コストが少なく、そして忠実さの高い $F(\phi)$ 再構成を提供するために、物理的に動機づけられたゆるい仮定だけ要求される。CRAFT はファラデー深度空間のスパースさと偏波角の変動を課すだけの柔軟なアルゴリズムである。我々は天の川銀河の現実的な $F(\phi)$ のモデルを使って実演を行っている。ここで CRAFT は他の著名なモデル非依存のテクニックと比べてそれを上回る潜在能力を示した。再構成された $F(\phi)$ を制限するためにウェーブレット変換を用いた新しいバージョンの CRAFT も開発している (Cooray ら準備中)。従来の技法に多くの改良を加えた CRAFT は、 $F(\phi)$ の強度やソース内の偏波角変動の複雑なマルチスケールの特徴を取り込むことでモデル依存型 (QU-fitting など) をも上回る改善を示している。

Faraday synthesis

3.1.1 節で述べたように、原理的には $F(\phi)$ は $P(\lambda^2)$ のフーリエ変換で得られる。ここで、天体の輝度である P は干渉計で得られるビジビリティをフーリエ変換する (これをイメージングと呼ぶ) ことで得られる。すなわち、生データであるビジビリティから $F(\phi)$ を得るために不完全なフーリエ変換を二度実行していることになる。Bell & Ensslin (2012) [22] では、ビジビリティ $V(u, v, \lambda)$ から空間 2 次元での $F(\phi)$ 、すなわち $F(x, y, \phi)$ (これをファラデーキューブと呼ぶ、3.2.1 節も参照) を一度の手順で計算する方法を提案した。ここで u, v は空間周波数、 x, y は天空面上の位置である。この方法を Faraday synthesis と呼ぶ。Faraday synthesis では、不完全なフーリエ変換が一度だけ実行されるため、空間分解能の向上・より正確でノイズの少ない $F(\phi)$ の再構築・より正確な輝度の再現などが可能になる利点がある。一方で、この手法の欠点は大量のメモリを必要とすることである。上記の論文では、64GB メモリだと (750 ピクセル)³ のデータキューブが限界であることが述べられている。

3.1.3 システム要求及び境界条件

プラットフォーム

ファラデーモグラフィは基本的に配列の四則演算の集合で達成されるものであり、CPU あるいは GPGPU で標準的な科学計算ができる環境があればよい。プログラミング環境は、C 言語や Fortran 言語など的高级言語のコンパイルと動作、Shell や Python のスクリプト言語の動作が保証されていけばよい。ため、Unix, Linux, MacOS, Windows などの OS プラットフォームも特に選ばない。ただし、高速化が求められる環境では、FFTW などの FFT ライブラリの導入や、CUDA や OpenCL などの GPGPU ライブラリの導入も求められる。さらに、日本の開発チームを含め、国際的にも、Python ベースのプログラムの共有と共同開発環境として Jupyter Notebook を用いることが増えており、Anaconda などのパッケージされたソフトの導入を求められるケースもある。なお Python に関しては、Python 3 系への以降が標準となりつつあるも、一部のソフトでは Python 2 系が求められることも稀にある。

ファラデーモグラフィのプログラムは、観測プロジェクトが提供していることがあり、その場合、国際的にパイプライン化するのが主流である。パイプラインでは、大抵の場合、物理変数は物理量単位通りに定義されているが、細かいところで違いがある場合も見られる。たとえば周波数は Hz または MHz、偏波強度は Jy または mJy などが採用されており、単位の違いには注意が必要である。さらには例えば POSSUM のパイプラインでは $q = Q/I$ や $u = U/I$ の値、つまり偏波率を使ってファラデーモグラフィが行われている。これはスペクトル指数の影響を軽減する狙いがある。またファラデースペクトルの単位は Jy であるが、ファラデー深度の関数であるので、単位ファラデー深度あたりのファラデースペクトル (Jy / rad / m⁻²) で示されることもある。ファラデーモグラフィの式のフーリエ変換の係数 π の定義が異なる場合もあり、こちらも第三者が作成したソフトウェアを使用する場合には注意が必要である。

境界条件 (観測スペック)

ファラデーモグラフィの性能を決めるパラメーター (RMSF の半値幅、観測可能な最大の ϕ 構造、観測できる最大の ϕ) は、観測される周波数スペクトルの帯域幅とチャンネル幅によって決

まる。SKA と、SKA 先行機の一例として Australian SKA Pathfinder(ASKAP) の主に周波数帯域に関するスペックをまとめ、ASKAP で用いられているパイプラインを紹介する。

表 3.1.1 に ASKAP の観測スペックをまとめた [23]。ASKAP の観測可能な周波数範囲は 700 MHz から 1800 MHz である。Full band での RMSF の半値幅は 22 rad m^{-2} であるが、同時バンド幅が 288 MHz なので一度の観測で全帯域のデータを得ることはできない。またバンドで分けると表にある半値幅となる。式 3.1.8 からわかるように、RMSF の半値幅である (FWHM) は基本的には低周波周波数帯がどれだけカバーできているかによって決まる。また、式 3.1.10 からわかるように、観測可能な最大のファラデー深度構造 ($L_{\phi, \text{max}}$) は最大波長に依存する。チャンネル幅は基本的に 1 MHz に束ねられるが、サイエンスによってはより細かな周波数分解能が求められるため、数 kHz オーダーまでチャンネル幅を細かくすることができる。式 3.1.9 にあるように、観測可能な最大の $\phi(\phi_{\text{max}})$ はチャンネル幅によるが、表ではチャンネル幅を 1 MHz を仮定し最も低い周波数チャンネル間から計算される値をまとめた。これは λ^2 空間で最も広いチャンネル幅を用いることになる。実用的には、 λ^2 空間で等間隔なデータにするために最も広いチャンネル幅を用いて平均化することになり得るので、実質的な ϕ_{max} は表のようになるであろう (3.2.1 節も参照)。

表 3.1.1: ASKAP の観測スペック

Band	周波数 [MHz]	FWHM [rad m ⁻²]	$L_{\phi, \text{max}}$ [rad m ⁻²]	ϕ_{max} [rad m ⁻²]
Band1	700-1200	28.59	50.27	3308
Band2	840-1440	41.17	72.38	5713
Band3	1400-1800	191.0	113.1	26430

ASKAP では、得られたビジビリティデータに関して RFI flagging、calibration(bandpass calibration、gain calibration、self calibration)、imaging、mosaicking、source finding の操作が自動化された ASKAPsoft という独自の tool が用いられている。パイプラインの流れは図 3.1.1 でまとめられている¹。データは西オーストラリアのパースの Pawsey Supercomputing Center に保存され、CSIRO ASKAP Science Data Archive (CASDA) と呼ばれる Virtual Observatory を介してユーザーはデータにアクセスすることができる。ユーザーはキャリブレーションされたビジビリティかイメージングされたものどちらかを選択することができる。

また、ファラデーモグラフィなどの偏波解析ソフトは ASKAP の偏波観測を行うグループである The Polarisation Sky Survey of the Universe's Magnetism (POSSUM) の Canadian Initiative for Radio Astronomy Data Analysis (CIRADA)-tools によって自動化されており、POSSUM パイプラインと呼ばれる。パイプラインの流れは図 3.1.2 でまとめられている²。CIRADA-tools では、偏波のキャリブレーション、電離層の補正から行うことができる。ファラデーモグラフィは特に RM-tools と呼ばれるソフトで解析できる。RM-tools では通常の RM-synthesis、RM-CLEAN、QU-fitting (Nested Sampling) を行うことができる。

最後に SKA1 の観測スペックを表 3.1.2 にまとめる。SKA1-LOW の帯域は 50 MHz から 350 MHz の 1 つのバンド、SKA1-MID は 5 つの Band から成る (6 章も参照)。しかし、コストマネジメント等の理由により Band3 と 4 の受信機の搭載は難しくなっている。表からわかるように、SKA は低周波数帯と高周波数帯の両方をカバーできているため、複数の band を組み合わせた広帯域のデー

¹<https://www.atnf.csiro.au/computing/software/askapsoft/sdp/docs/current/pipelines/introduction.html>: image credit

²<https://askap.org/possum/Pipeline/Pipeline>: image credit

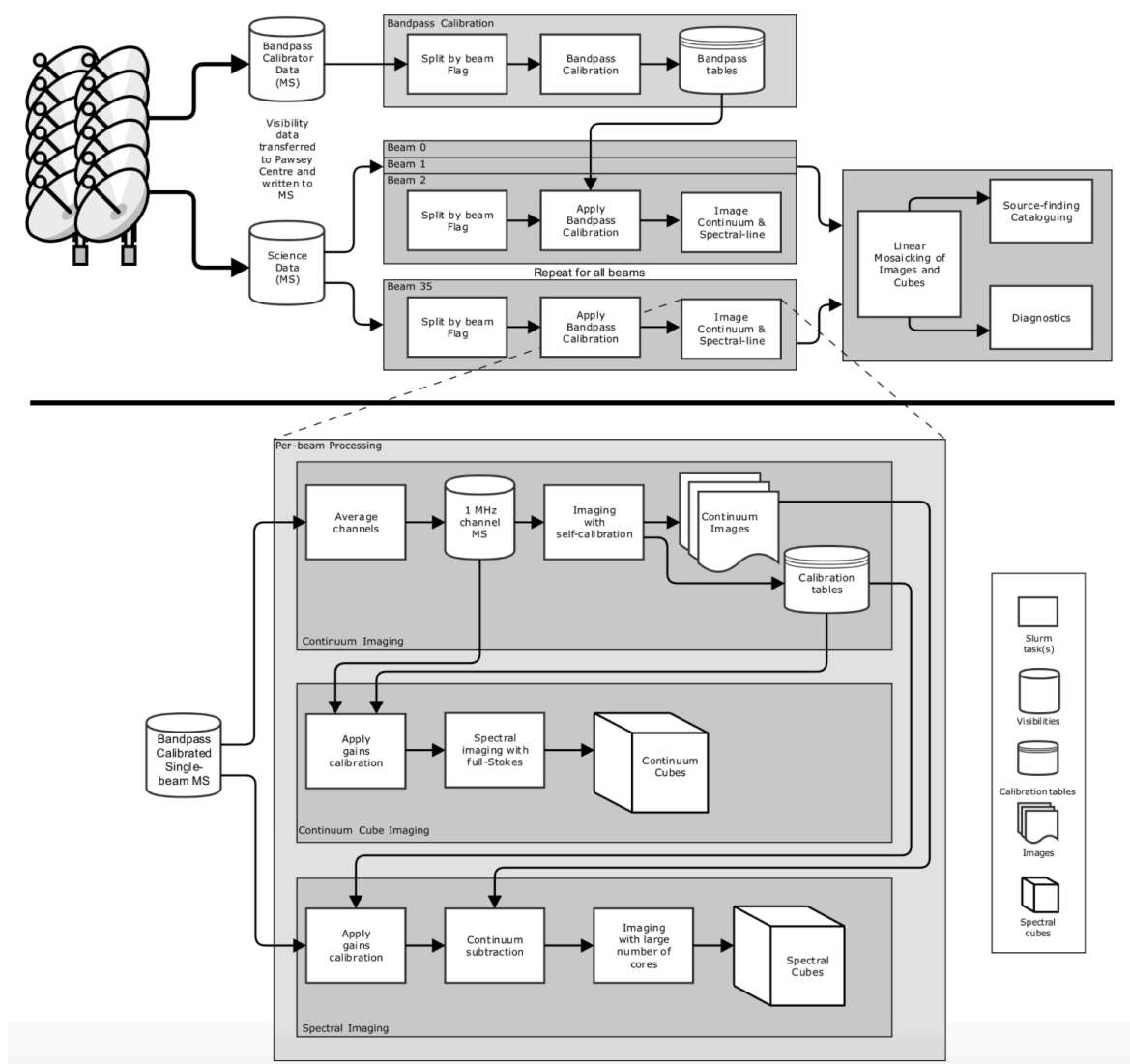


図 3.1.1: ASKAPsoft Overview

タにより、ファラデーモグラフィの精度は大きく向上する。LOW と MID は同時観測できると仮定し、例として SKA-LOW、SKA-MID の Band1、2 を合わせた直線偏波スペクトルを考えると、ファラデーモグラフィの分解能の目安である FWHM は $0.096 \text{ [rad m}^{-2}\text{]}$ と非常に細かい構造まで見ることができ、観測可能な最大の ϕ 構造も $108 \text{ [rad m}^{-2}\text{]}$ と大きくなる。なお、例えば系外偏波源の $|RM|$ はおよそ数百 rad m^{-2} になり得るので [24]、SKA1-LOW の $\phi_{\text{max}} \sim 1 \text{ rad m}^{-2}$ では実質的な宇宙磁場研究は難しいが、これは小さなチャンネル幅を採用することで解決できる。

3.1.4 SKA のデータとデータプロセッシング

ここで観測所のデータプロダクトについて簡単にまとめた上で、ファラデーモグラフィのデータプロセッシングに関する要求をまとめる。

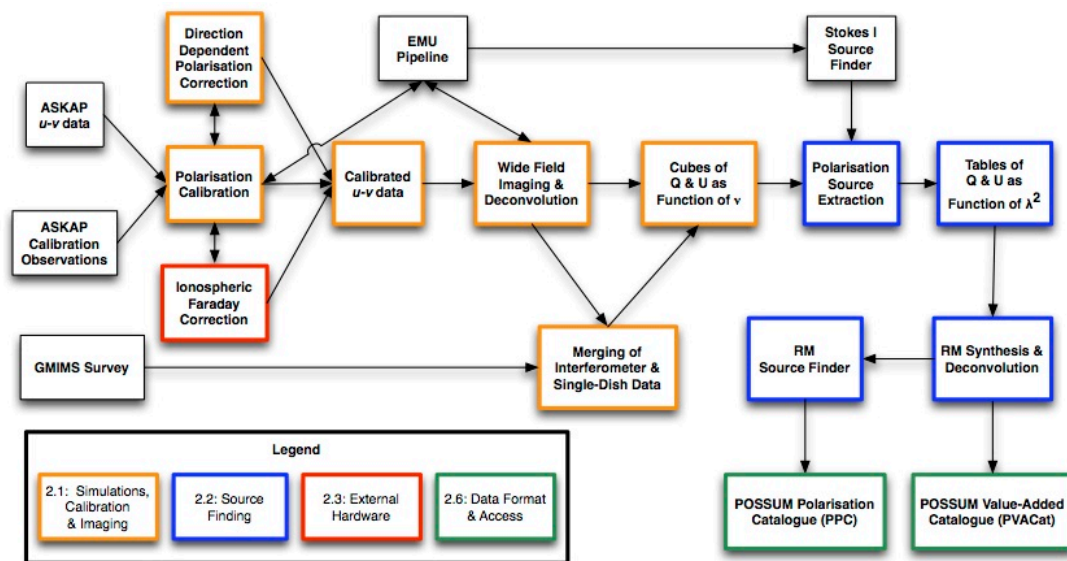


図 3.1.2: POSSUM pipeline Overview

表 3.1.2: SKA1 の観測スペック

Band	周波数 [MHz]	FWHM [rad m ⁻²]	$L_{\phi, \max}$ [rad m ⁻²]	ϕ_{\max} [rad m ⁻²]
SKA1-LOW	50-350	0.098	4.276	1.239
SKA1-MID Band1	350-1050	5.304	38.48	414.3
SKA1-MID Band2	950-1760	49.02	108.1	8263
SKA1-MID Band3	1650-3050	148.1	324.7	43260
SKA1-MID Band4	2800-5180	426.3	936.6	211300
SKA1-MID Band5	4600-15400	894.2	8278	936900
LOW+Band1+2	50-1760	0.096	108.1	1.239

SKA のデータ : ODPs と ADPs

SKAO はまず大きく分けて Observatory Data Products (ODPs) と Advanced Data Products (ADPs) の2タイプのデータを定義している。前者は科学データ処理 (SDP) から生成されるもので、データの quality assessment (QA) とアーカイブの責任は SKAO にある。後者はユーザーやサーベイチームが ODPs を使って SKA 地域センター (SRC) で作るもので、QA の責任はユーザーやチーム、アーカイブの責任は SRC にある。

ODPs はさらに Observation-level data products (OLDPs) と Project-level data products (PLDPs) に分かれる。OLDP は一つのスケジューリングブロックのひとつの観測実行で得られる基本的な観測データである。PLDP は観測 PI の本来の観測提案に沿って OLDP を加工したデータである (端的な例では複数の OLDP を束ねたもの。PLDP は SRC で作ることも可)。OLDP には

- Image cubes (周波数の関数としての結像結果)
- UV grids (空間・周波数方向にグリッド化されたビジビリティ)

- Calibrated visibilities (時間・周波数方向に平均化されたビジビリティ)
- Local Sky Model Catalogue (いわゆるソースカタログ)
- Imaging Transient Source Catalogue (トランジェント天体の時系列カタログ)
- Pulsar Timing Solutions (パルサーのパルスデータ)
- Transient Buffer Data (ボルテージの時系列データ)
- Sieved Pulsar and Transient Candidates (de-dispersion/folding したパルスデータ、P, Pdot 情報)
- Science Alerts Catalogue (IVOA フォーマットのアラートカタログ)
- Science Product Catalogue (SDP で生成したデータのカatalog)

3 番目の ” Calibrated visibilities ” は「全く時間・周波数平均しない=生ビジビリティ」も指定可能である。ただし膨大なデータを吐き出すため、プロポーザル時点で真に必要と認められ採択されていることが必要である。このような生データの SRC への転送は、フル SKA1 の定常運用時では全体の数%にも満たない予定である。

観測所では、各 PI のプロポーザル要求に対応した PLDP を生成し SRC に送るが、合わせて「レガシーデータ」として基本的な観測データ・メタデータ・ログなどを長期アーカイブに残す。この「基本的な」データというのが何かはまだ確定していないが、上記の様々なデータの集合になるだろう。生のビジビリティデータを全て残すことは、ストレージ容量からいってまずない。なお、AA2 までは生データも SRC に送られる予定になっている。これはユーザー・チームが最適な SDP パイプラインおよびそのパラメータが何かを研究できるようにするためである。また AA2 までは OLDP や PLDP を一旦 SRC で確認してから、再プロセスを SDP にリクエストすることも多少できるようにする予定である。AA2 までのフェイズで研究を重ねた上で、フル SKA1 では基本的に生のビジビリティデータは残さないようになる。

ファラデートモグラフィーのデータ

前節の簡条書きにないことから分かる通り、現在の SKA のデザインにもとづく、ファラデートモグラフィーは OLDP として SDP で生成されない見込みである。つまりファラデートモグラフィーのデータは ADP である。ファラデートモグラフィーは QU 両偏波の周波数スペクトルから SRC で計算されデータが生成される。つまり SDP から SRC に Image Cube データ（あるいはソースカタログ化された各ソースの QU 両偏波周波数スペクトル）を転送しなければならないが、トモグラフィーではひとまず時間分解能はほぼ必要なく、周波数分解能も 0.1 MHz もあれば概ね良さそうであるという我々や世界的な研究例があるので、データ量は大きな障害ではないと見込まれる。例えば、SKA1-Mid Band2 サーベイでは 100 万の偏波源が受かることが予想されている [25]。それらの直線偏波(ストークス Q&U) のスペクトルを Band 2 の帯域で 100 kHz チャンネル幅で保存すると、約 65GByte の容量が必要となる。ストレージ量だけであればラップトッパー一つでも足りる。偏波源と見つかったソースにだけファラデートモグラフィーを行う分には、ストレージの問題はない。一方、ファラデートモグラフィーの演算リソースはかなりを要する(3.2.1 節参照)。

周波数スペクトルの品質が精度に直接影響するファラデートモグラフィーには、RFI の影響は重要な問題である。RFI の除去は、時間・周波数方向に平均化されたデータの再処理からでもできな

くはないが、効率と精度を考えると生ビジビリティで行うべきである。その観点で、生ビジビリティが SDP バッファにあるうちに、RFI の除去については最善を尽くす必要がある。RFI がどの程度どのように加わると、ファラデートモグラフィにどのような影響が起こるかの研究はわずかにある [26, 27]。構築するファラデースペクトルの品質 (RMSF の品質) に少なからず影響がある。

このようにして SRC に届けられた Image Cube のデータに対してファラデートモグラフィを行う場合に、その演算コスト (計算機要求) はファラデートモグラフィの手法に大きく依存する。この点については 3.2.1 節および 3.3.3 節などで述べる。

3.1.5 トモグラフィの手法比較

3.1.2 節で述べたように、ファラデートモグラフィの手法が複数提案されている。これらの手法の得手不得手を把握することは得られた結果の解釈に必要不可欠である [28]。そこで、ある $F(\phi)$ を仮定の上で模擬偏波スペクトル $P(\lambda^2)$ を用意し、複数の手法でどの程度正確に $F(\phi)$ を再構築できるかの比較を行なっている (Ideguchi ら準備中)。ここでは、現実的な銀河モデル [29] から計算された $F(\phi)$ をモデルとして用いた [30]。図 3.1.3 は上から RM synthesis+RM CLEAN、QU-fitting、スパースモデリング、CRAFT の結果を示している。灰色の線で描かれた $F(\phi)$ はモデルである。RM synthesis+RM CLEAN はパネル左上にある ϕ の分解能程度の再現であるのに対し、スパースモデリングと CRAFT は分解能以上の再現を見せている。特に CRAFT は明るさやピークの位置などをより良く再現できている。唯一のパラメトリックな手法である QU-fitting では、複数のガウシアン成分をモデルとする簡単な仮定を用いた。結果として細かな振る舞いの再現は不可能だが、大まかな構造、明るさ、ピークの位置は再現が可能という結果になった。

3.1.6 偏波観測の課題

leakage 補正

偏波サーベイのほとんどは、ターゲット天体を on-axis 観測するのではなくモザイクイメージから構成されるため、正確なストークスイメージキューブを得るには on-axis から離れた偏波源からも信頼できる情報を得る必要がある。よって、全ストークスパラメータの主ビームの応答を考慮する必要がある。適切な off-axis instrumental polarization の補正無しでは、偏光していない天体が偏波源となったり、偏波源の偏波特性が本来のものから逸脱してしまう。この instrumental effect はロバストな RM 推定の主な limiting factor となり、特にファラデートモグラフィでは、 $F(\phi)$ 上での余計な成分としても現れる。また、この効果により他のストークスパラメータがストークス I に漏れ込む可能性もあり、これは偽の EoR signal を生み出しだり本来の signal を歪める可能性があるため、この効果は磁場サイエンスだけでなく EoR 研究にも重要な問題である。全ストークスパラメータの主ビーム応答のパターンを補正することでこの効果は補正できる。そのために正確なビームモデルが必要であり、モデル化の手法がいくつか考えられている。

- 天体のあるアンテナで観測し、別の複数のアンテナでその天体の周囲を観測する (ホログラフィーと呼ばれる) ことで、天体に向けたアンテナの off-axis leakage を見積もる。
- 複数の点源を用いて、それらが無偏波だと仮定することで、off-axis leakage を見積もる。また、primary beam を Zernike 多項式で近似することで leakage の補正を行う。

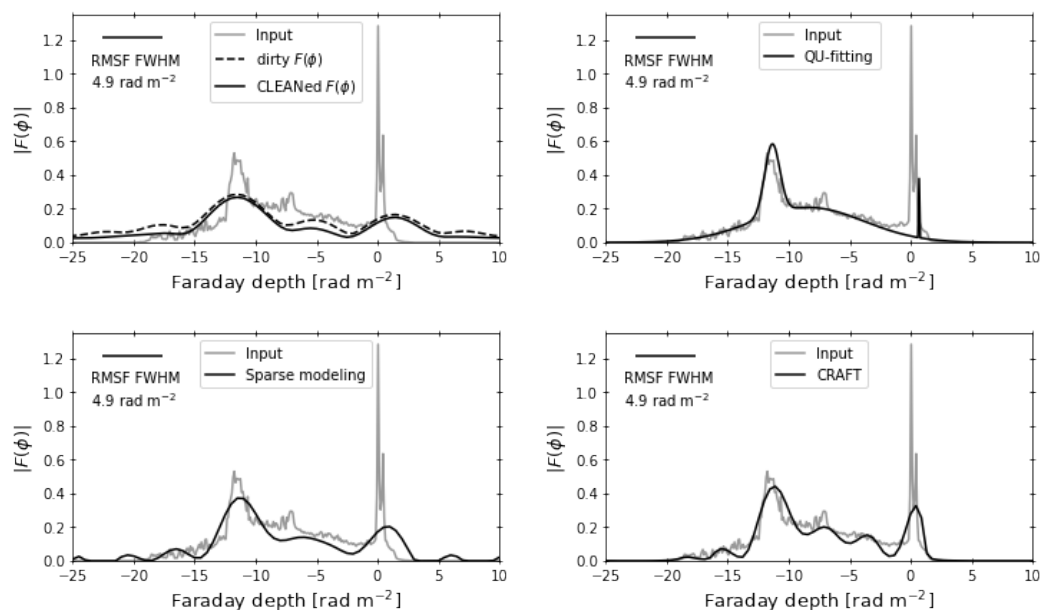


図 3.1.3: 手法の比較。観測周波数帯域として SKA1-MID band1+band2 (350 - 1760 MHz) を仮定している。それぞれ RM synthesis+RM CLEAN (左上)、 QU -fitting (右上)、スパースモデリング (左下)、CRAFT (右下) の結果。灰色の線で描かれた $F(\phi)$ は入力モデルである。各パネルの左上に、周波数帯域から決まる ϕ 空間上の分解能 (FWHM) を示している。

電離層 RM 補正

低周波 ($\lesssim 1$ GHz) では電離層による RM の不定性 (~ 1 - 2 rad m^{-2}) がトモグラフィーによる RM の精度より大きくなる。また、電離層による RM は時間変動するため天体からの放射を消偏波させる効果もある。そのため、天体由来の小さな RM やその変動を検出するには、電離層 RM の補正は非常に重要となる。電離層 RM は、電離層の電子密度と磁場を薄い球殻内で積分したもので近似されることがよくある。最近、公開されているグローバル電離層マップ (Global Ionospheric Map, GIM) と LOFAR によるパルサーの RM の厳密な比較が行われた [31]。その結果、電離層 RM は電離層全電子数マップにより支配されていることが判明し、Jet Propulsion Laboratory GIM (JPLG)[32] と Polytechnic University of Catalonia's rapid GIM (UQRG)[33] がより優れていることがわかった。

3.2 ファラデートモグラフィーを成功させるための課題・目標

この節ではシステム要求を満たすための課題・目標をまとめるが、ファラデートモグラフィーはソフトウェアであるので、ファラデートモグラフィーを適切に動作させそしてその効果を確かにする、そのような要件を満たすための課題と目標をまとめる。

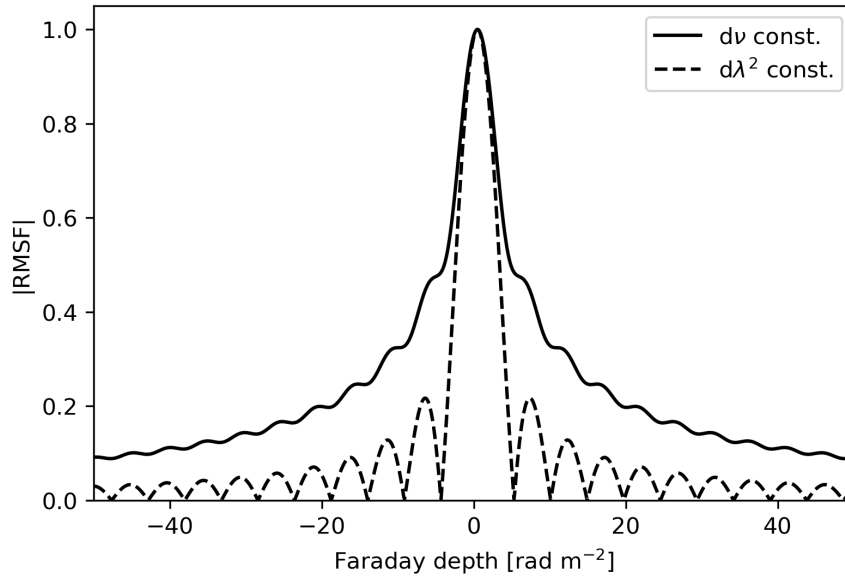


図 3.2.1: RMSF の比較。観測周波数帯域として、SKA1-MID band1 (350 - 1050 [MHz]) を仮定している。実線が周波数空間で等間隔にサンプルされたデータの場合 (dv const.)、破線が波長の二乗空間で等間隔にサンプルされたデータの場合 ($d\lambda^2$ const.) を示している。

3.2.1 共通の課題

データフォーマット

式 3.1.4 からわかるように、ファラデーモグラフィは基本的に波長の二乗空間で等間隔にサンプルされたスペクトルに対して計算が行われる。一方で、観測データは基本的に周波数空間で等間隔に得られる。二つのサンプルの仕方によって RMSF の形状が変化するため (図 3.2.1)、波長の二乗空間で等間隔なスペクトルの方が $F(\phi)$ の再現性が良いことがわかっている [34]。また、低周波、広帯域なデータほどこの効果は大きくなる。そのため、波長の二乗空間で等間隔になるように観測データを平均化することも試されている [35]。

演算コスト

表 3.2.1 に $P(\lambda^2)e^{-2i\phi\lambda^2}$ もしくは $F(\phi)e^{2i\phi\lambda^2}$ を計算する大まかな回数をまとめる。変数の意味はそれぞれ、周波数のチャンネル数 (N_ν)、 ϕ のチャンネル数 (N_ϕ)、アルゴリズムの反復回数 (N_{iter})、レプリカ交換法のレプリカ数 (N_{beta} 、一般には ~ 10)、モデル数 (N_{model} 、一般には ~ 10)、CV のデータ分割数 (N_{cv} 、一般には ~ 10)、制約項の組み合わせ数 (N_{reg} 、一般には ~ 100) である。参考までに、 $N_\nu = N_\phi = 1000$ とし、一般的なノートパソコン (Intel Core i5, 3.30 GHz) で Fortran90 にて RM synthesis を DFT を用いて行くと、計算時間は ~ 0.06 秒であった。DFT は行列積として計算できるので、BLAS などのライブラリを用いることでより高速化できる可能性もある。QU-fitting は計算する関数が異なるが、最も単純なモデル (デルタ関数 1 成分) だと計算コストとしてはほぼ同じで

ある。より複雑なモデルや複数成分を含むモデルだとモデルパラメータの数が増え反復ごとの計算コストは大きくなる。RM CLEAN、CRAFT、Sparse Modeling の N_{iter} は状況によって大きく値が異なり得る。 N_{model} 、 N_{beta} 、 N_{reg} 、 QU -fitting の N_{iter} はユーザーの設定で決まる。RM synthesis、CRAFT、Sparse Modeling は FFT を用いることで計算コストを削ることが可能である。 QU -fitting の N_{beta} と N_{model} 、Sparse Modeling の N_{cv} と N_{reg} については独立に扱えるので並列/並行して計算でき、複数 CPU コアを用いることで計算時間の短縮が可能である。

表 3.2.1: 各手法の大まかな計算コスト比

手法	計算コスト	N_{iter}	コスト比	FFT ブースト	並列/並行計算
RM synthesis	$N_v N_\phi$	-	1	○	×
RM CLEAN	$2N_\phi N_{\text{iter}}$	$\sim 10^2$	1	×	×
CRAFT	$2N_v N_\phi N_{\text{iter}}$	$\sim 10^2$	10^2	○	×
QU -fitting	$N_v N_{\text{iter}} N_{\text{beta}} N_{\text{model}}$	$\sim 10^4$	10^4	×	○ ($N_{\text{beta}}, N_{\text{model}}$)
Sparse Modeling	$2N_v N_\phi N_{\text{iter}} N_{\text{cv}} N_{\text{reg}}$	$\sim 10^4$	10^6	○	○ ($N_{\text{cv}}, N_{\text{reg}}$)

3次元ストークスキューブからの直接演算

多くのファラデートモグラフィープログラムは、周波数の関数としての Q と U のデータをインプットに、ファラデー深度の関数としての複素ファラデースペクトルを返すものになっている。ここで、 Q と U は本来は位置の関数になっており、空間2次元に周波数方向1次元の3次元配列（これをストークスキューブと呼ぶ）がもとになっている。ゆえにストークスキューブから直接ファラデートモグラフィーを実行できる方法の開発が、本来の意味のトモグラフィーを実現するために重要である。一方で、RM-Tools³や pyrmsynth⁴などの最近のパイプラインでは RM synthesis と RM CLEAN についてのみこの方法が実装されている。一般にストークスキューブのデータ量は大きく、ますます計算コストが重要な課題である。この点、入力されたストークスキューブを空間方向に分解し、GPU の大量のコアを用いて並列/並行に解くことで RM synthesis の高速化を図るソフトウェアも開発されている [36]。

Faraday thick 成分の検出

一般的に表 3.1.1 や 3.1.2 の FWHM より広がった構造は Faraday thick と呼ばれる。RM CLEAN は RMSF(点源) を繰り返し差し引いているため、Faraday thick な FDF の再構成は不得意である。スパースモデリングは解の滑らかさに制約をかける TSV 項に強い制約をかければ、広がった成分を構築することが可能である。CRAFT では、偏光角をスムージングするという仮定が適切な状況であれば、広がった構造を精度よく再現することが可能である。 QU -fitting では、比較的簡単なモデルを仮定しても広がった成分を検出できることがわかっている。そもそも $L_{\phi, \text{max}}$ を超える構造に対しては著しく感度が下がるため、あらゆる方法をもってしても検出し再現するのは難しい。

³<https://github.com/CIRADA-Tools/RM-Tools>

⁴<https://github.com/mrbell/pyrmsynth>

多重の Faraday 成分の検出

銀河のファラデースペクトルは Ideguchi et al. (2014b) [30] にあるように、数学的に簡単な関数で記述できず、非常に複雑な構造をしている (図 3.1.3)。図のスパイク構造にも乱流磁場などの情報が含まれているため、正確にファラデースペクトルを再構築する必要がある。しかし、このような複雑なファラデースペクトルを完全に再構築するのは難しく (3.1.5 節参照)、より正確なファラデースペクトルを再現する手法の開発が課題である。

Non-uniform FFT の導入

λ^2 空間で等間隔にサンプリングされていないデータでは、フーリエ変換において数値誤差が混入するため、精度が悪くなる。対策としては非等間隔の FFT を実装する必要がある。

アルゴリズムの難しさ

ファラデートモグラフィは高度な手法になるほど複雑な処理が加わるため、ユーザーが使いにくいものになりがちである。多くのシステムで動作するような可搬性 (ポータブル) や最適化性 (たとえばマルチスレッド環境での並列動作) を改善する必要がある。

3.2.2 個別の課題

RM CLEAN

RM CLEAN の課題は、標準の RM CLEAN は点状 (デルタ関数的) 光源を本質的に仮定しているために、ファラデー深度方向に広がった FDF に対して、劣る結果を得る傾向があることである。また、RM CLEAN は、干渉系での CLEAN と同じく、ビームパターンを考慮した点状光源を取り除き、ガウス関数で戻すという操作を行うが、ノイズレベルに比べてこの取り除きのしきい値をどのようにして決めるかには自由度があり、最適化が必要である。

QU-fitting

QU-fitting の課題は、モデルが必要であるという点である。強度や偏波角の細かいスケールの変化があれば、単純なモデルを仮定した場合には損なわれる。また、通常の MCMC 法では局所解に捉われることが多々あるので、その対策としてレプリカ交換法を用いる。これは、温度の異なる系 (レプリカ) を複数用意し、それぞれで通常の MCMC を走らせ、メトロポリス法の基準でそれぞれのレプリカ間で系の状態を交換する方法である。高温の系ではエネルギーの差分が大きくても採択確率は比較的大きくなり、この情報を低音の系に持っていくことで局所解の問題を軽減できる。

スパースモデリング

スパースモデリングの課題は、演算コストが大きいことである (3.2.1 節も参照)。また、制約として L1 と TSV を同時に課す方法ではマルチスケールの構造の再現が難しいという傾向もある (上述の多重の Faraday 成分の問題も参照)。これは $l1$ と TSV を別々に課したり、異なる制約を課すことでより良い再現が可能になるかもしれない。

CRAFT

CRAFT の課題は、比較的ノイズの影響を受けやすく、S/N の小さいデータで、 $F(\phi)$ のピークの再構成が乏しくなり有効に働かない場合がある。また、偏波角が ϕ 空間でスムーズであるという仮定を用いているため、偏波角の細かい変動する場合には、その変動を損ねてしまう。これは、ウェーブレット変換を用いた新しい方法で解決できるかもしれない (Cooray ら準備中)。

3.3 日本の経験（開発・準備状況）と計画

3.3.1 日本での活動実績

ファラデートモグラフィのコード開発

技術検討班では RM CLEAN, QU -fitting, スパースモデリング, CRAFT のソフトウェア開発を行い、その性能評価や性能の比較を行っている [17, 20, 21, 37, 38], (Ideguchi ら準備中)。特に我々の QU -fitting のコードは、ASKAP の偏波サーベイ計画である POSSUM のデータパイプラインの開発に大きく寄与した。さらに、3.2.2 節で述べたように、局所解の問題を軽減できるレプリカ交換法を用いた QU -fitting のソフトウェア開発 (Ideguchi ら準備中) および性能評価 (Miyashita ら準備中) を進めている。また、ウェーブレット変換を用いた新しい CRAFT の開発 (Cooray ら準備中) や、 $\ell 1$ と TSV 制約を別々に解く新しいスパースモデリングコードの開発 (Ideguchi ら準備中) も行っている。

3.3.2 POSSUM での活動実績

個々のビームデータとモザイクデータの比較

試験観測データを用いて、個々のビームと複数のビームをモザイクしたデータを比較しその違いを定量的に評価することで、モザイクの影響を調べた。具体的には直線偏波スペクトル $P(\lambda^2)$ の相関係数

$$C_P = \frac{\sum_i^{N_{\lambda^2}} (|P_m(\lambda_i^2)| - |\bar{P}_m(\lambda_i^2)|)(|P_b(\lambda_i^2)| - |\bar{P}_b(\lambda_i^2)|)}{\sqrt{\sum_i^{N_{\lambda^2}} (|P_m(\lambda_i^2)| - |\bar{P}_m(\lambda_i^2)|)^2} \sqrt{\sum_i^{N_{\lambda^2}} (|P_b(\lambda_i^2)| - |\bar{P}_b(\lambda_i^2)|)^2}} \quad (3.3.1)$$

やファラデースペクトル $F(\phi)$ の相関係数

$$C_F = \frac{\sum_i^{N_\phi} (|F_m(\phi_i)| - |\bar{F}_m(\phi_i)|)(|F_b(\phi_i)| - |\bar{F}_b(\phi_i)|)}{\sqrt{\sum_i^{N_\phi} (|F_m(\phi_i)| - |\bar{F}_m(\phi_i)|)^2} \sqrt{\sum_i^{N_\phi} (|F_b(\phi_i)| - |\bar{F}_b(\phi_i)|)^2}} \quad (3.3.2)$$

によって評価した。ここで、 P と F はそれぞれ直線偏波スペクトルとファラデースペクトル、 m と b はモザイクデータとシングルビームデータ、 N_{λ^2} と N_ϕ はそれぞれのスペクトルの λ^2 空間と ϕ 空間における bin の数、 \bar{X} はその平均値を表す。さらに、その相関係数のビーム中心からの距離の依存性を調べ、信頼できるビーム半径を決定した。図 3.3.1 は $P(\lambda^2)$ と $F(\phi)$ の相関係数をビーム中心からの距離の関数でプロットしたものである。エラーバーは 0.2 [deg] ごとに計算している。相関係数の平均が 0.8 以上となるビーム中心からの距離は 0.6[deg] である。

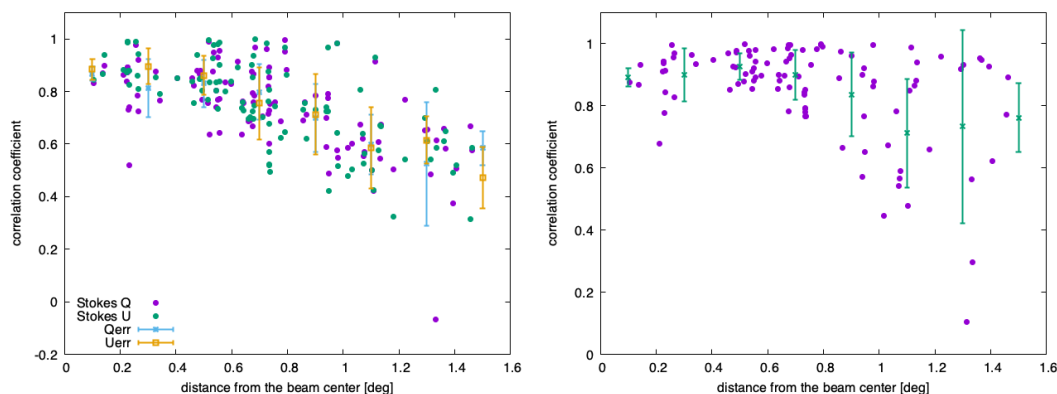


図 3.3.1: ビーム中心からの距離の関数で示した 100 天体の相関係数のプロット (左図: 直線偏波スペクトル、右図: ファラデースペクトル)。エラーバーは 0.2 [deg] ごとの標準偏差を示す。

leakage 補正の手法比較

3.1.6 節で述べたように、leakage の補正は宇宙磁場研究はもちろん、EoR 研究においても重要な課題である。POSSUM では今後の観測の準備として wide-field での off-axis leakage の補正のより適切な手法を調べている。特に 3.1.6 節でも述べた、ホログラフィーと複数の点源を用いる 2 つの方法を比較し、どちらの手法がより良いか、また今後の観測データへの解析に使用するかを調べている。図 3.3.2 では上記 2 つの手法を ASKAP の Phased Array Feed (PAF) による 36 のビームそれぞれで比較している。基本的には 2 つの手法で大きな違いはないことがわかった。このように、ファラデーモグラフィに限らず宇宙磁場研究を行う上で問題となる課題に取り組む国際的な議論にも参加し、プレゼンスを示している。

POSSUM パイプラインへの我々のコードの実装

POSSUM パイプラインには QU -fitting のコードも搭載されている。 QU -fitting の手法として以前は MCMC が使われており、我々のコードも実装されていたが、現在は Nested Sampling 法が採用されている。一方で、我々の MCMC コードの方が計算コスト、性能 (最適解を正確に再現する能力)、共に優れていることが最近のテストで判明している。今後は POSSUM パイプラインの開発責任者と協力して我々の MCMC コードの実装を試みていく。同時に、我々の他のコードの実装の可能性も探っていく。

3.3.3 日本の参加計画案

個別研究の推進

日本はファラデーモグラフィの研究開発を国際的にも大きな組織で行っており、その実績は世界のトップレベルにあると自負している。これはこれまでに出版しているファラデーモグラフィ関連の論文数から見ても明らかである。今後も研究イニシアチブを維持するために、まずはプロジェクトに強く依らないファラデーモグラフィの個別研究を一層推進し、世界トップレベルの技術力を維持していくことを目指す。今後も、それぞれのアルゴリズムの特性の理解

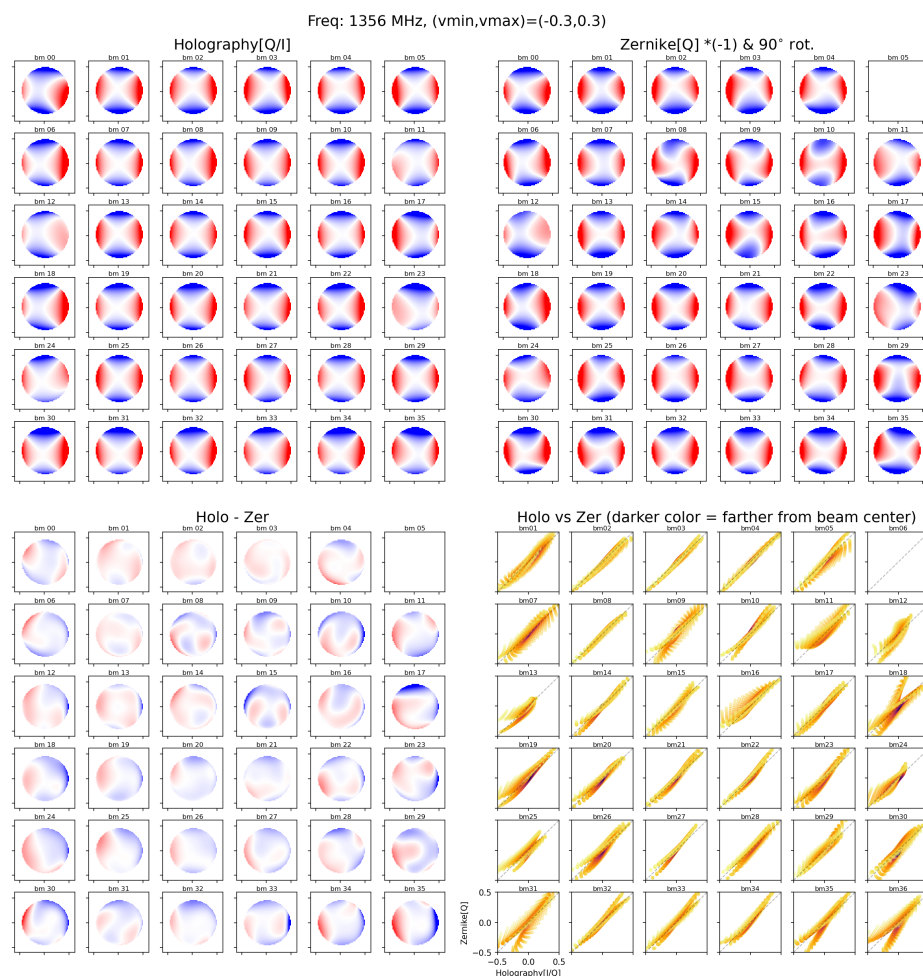


図 3.3.2: leakage 補正の手法の比較。左上はホログラフィーを用いる方法、右上は複数の点源を用いる方法、左下は二つの手法の差、右下は二つの手法の相関である。それぞれ PAF の 36 個のビームを示している (ビーム 05 はデータが無いのため抜けている)。

と、性能改善の研究を進める。上述の通り、レプリカ交換法を用いた *QU-fitting* の開発や、ウェーブレット変換に基づく *CRAFT* 法の高精度化を進める。また、様々なアルゴリズムの系統的なテストを行うことも進める。具体的なテスト項目としては、*FDf* の特徴（ファラデースペクトルの厚み、多重のソースの区別、偏波角の変化）を再現できるかや、観測ノイズの影響、そして λ^2 空間のサンプリング（チャンネル幅や周波数網羅性）の影響である。

研究課題の質的転換

SKA の時代に超広帯域で高感度のデータが得られる時代には、現在のデータで抱える問題とは質的に異なる問題が顕在化すると予期する。具体的には、現在は狭帯域なためにファラデートモグラフィーの精度が悪いあるいは動作が適切でないような事例は、広帯域なデータが得られることで改善され、主たる問題とはなくなることがありうる。一方で、非常に膨大なデータの処理が必要となるために、現実的な時間で処理が終わらないという問題も起こりうるだろう (3.1.4

節のデータプロセッシングも参照)。ゆえに、高速化・効率化がより重要な課題となってくる。効率化の観点では、機械学習などのパターン認識技術を応用し、得られるファラデースペクトルを人の手を介せずに分析する研究にも関心がある。このパターン認識技術を、物理的なアウトプットにつなげるためには、比較認識させるパターンとしての物理モデルの提案も引き続き重要であり、それにも取り組む。これらが両方組み合わさって、始めてSKA時代のファラデートモグラフィの解釈の部分の問題が解決されるだろう。

データチャレンジへの参加

SKA時代のデータ整約そしてデータ解析に慣れることを目的として、SKA天文台はScience Data Challenge (SDC)をこれまで企画している。第一回は連続波データ、第二回はHI輝線データであった。そして近く、Magnetism Science Data Challenge (MSDC)が企画されようとしている。MSDCの詳細は執筆時点ではまだ検討段階にあるが、その中でファラデートモグラフィによる光源の検出が課題の一つとなると見込まれる。我々はそこに参画して、我々のファラデートモグラフィのアルゴリズムやパイプラインの性能を実演し、プレゼンスを示していく。MSDCへの参加は、コミュニティ間の開発競争を奨励するものでもある。ここに参加し情報交換に加わっていくことは、我々自身の技術力の向上にとっても有意義である。

国際的なSRCへのパイプラインの提供

開発した日本のパイプラインを国際SWGに提供し、磁場研究の発展に貢献する。パイプラインを利用して頂くため、コードを使いやすい形に編集し、また様々なプラットフォームでも動作するよう試験をし、提供することが必要である。たとえばウェブベースでデータを入力（アップロード）すると、自動でファラデートモグラフィを実施するサーバーが欲しいという需要もある。このような普及面の活動にも重きを置いて進めていく。なお、SRCへの貢献は建設費への貢献ではないので観測時間などへのリターンにはつながらないが、SRCへの貢献がなければ、日本のコミュニティはSKAの観測データにアクセスできないので、この貢献は日本のSKAへの参画にとって極めて重要である。

著者一覧（○は編集責任者）

赤堀卓也	国立天文台
○出口真輔	ラドバウド大学
COORAY, Suchetha	名古屋大学
國分厚志	熊本大学
菅原充祥	山形大学
高橋慶太郎	熊本大学
滝沢元和	山形大学
二木惇太郎	熊本大学
宮下恭光	熊本大学

第4章 SKA1-LOW EoR パイプライン

執筆: LOW-EoR パイプライン検討 WG

SKA1 Low の主要なサイエンスである宇宙再電離期以前の中性水素ガス由来の 21 cm 線の観測は初代星や初代銀河の進化や宇宙再電離の進化を明らかにすることができると期待されている。ただし 21 cm 線のシグナルは非常に微弱であり、検出には高精度のキャリブレーションや装置の高い安定性が求められる。本章では特に SKA1 Low のキャリブレーションに関して、21 cm 線観測に向けて求められている性能や現状の課題、日本の貢献案について記述する。

4.1 LOW & SDP に対する要求

4.1.1 EoR 観測の概要

21 cm 線パワースペクトルの検出及び 21 cm 線の直接撮像は SKA1 Low の主要サイエンスである [39]。宇宙再電離期やそれ以前の宇宙に銀河間物質中の中性水素から放射された 21 cm 線の観測は、当時の初代星や銀河進化、さらに宇宙論的情報を明らかにすると期待されている。例えば再電離期中の電離バブルや密度分布に依存して 21 cm 線は揺らぎを持ち、パワースペクトルによる解析を通して揺らぎを作る電離源の特徴が探査できる。21 cm 線は赤方偏移してメートル波(低周波)として観測される。異なる周波数の 21cm 線観測は視線方向の観測に対応するため、天球面上の 2 次元的情報に加え、周波数方向を合わせた 3 次元的な 21 cm 線分布とその進化を探査することができる [40]。

予想される 21 cm 線の強度は数 mK 程度と非常に微弱であり、観測に伴う熱雑音やキャリブレーションの誤差を極限まで落とす必要がある。さらに、銀河系や系外銀河由来の前景放射は 21 cm 線より 3 桁以上も明るいいため、21 cm 線パワースペクトルの検出やイメージングには前景放射除去を行う必要がある [41]。前景放射はシンクロトロン放射や自由-自由放射が主であり、非常に滑らかなスペクトルを持つ。この特性を元に様々な前景放射除去方法が開発されている。また、前景放射が滑らかなスペクトルを持つことから、パワースペクトル観測では EoR 窓という前景放射軽減法が可能になる (e.g. [42])。再電離期の 21cm 線観測において、連続する周波数の観測は奥行き方向の揺らぎの観測に対応する。そのため、周波数に関して滑らかで構造を持たない前景放射のパワーは k_{\parallel} の小さい(視線方向の大スケール)領域と Wedge と呼ばれる範囲に限定される。一方、それ以外の EoR 窓と呼ばれるスケールでは前景放射の寄与が弱くなり 21 cm 線が優位に観測できると期待される。ただし、装置のキャリブレーションエラーなどに伴って、前景放射の寄与は EoR 窓の中に漏れ込んでしまう [43]。これまで、MWA[44, 45] や LOFAR[46] など SKA1 Low の先行機によって EoR 窓の手法を使ったパワースペクトルの解析が行われているが、21 cm 線の観測には至っていない。これは主に観測における様々なシステムティクスが前景放射の影響を EoR 窓内に伝搬させているためである。

さらに、SKA1 Low では 21 cm 線の直接撮像を達成するために 1000 時間以上の深い積分を行う。21 cm 線の直接撮像を本当に達成するためには 1000 時間の積分後、熱雑音以外のイメージングノイズも熱雑音以下まで低減する必要がある。キャリブレーションエラーやビームのサイドローブ中にある明るい点源の作る誤差が感度を制限する。以下では 21 cm 線検出の目標を達成するために SDP, SRC に要求されるキャリブレーションの精度に触れる。

4.1.2 キャリブレーション要求精度

前景放射に比べて 3 桁以上も微弱な宇宙再電離期 21 cm 線の検出を達成するためには、非常に高精度なキャリブレーションが不可欠である。特に SKA1 Low の科学目標の 1 つである 21 cm 線の直接撮像達成には、イメージングの際に行う 1000 時間積分後にノイズを熱雑音レベルまで低減させる必要がある。SKA1 Low を想定した要求精度は [47] と [48] で検討され、L1 要求文書 [5] に記載されている。以下では、SKA1 Low で実際に要求されている精度に関して、上記の文章や検討グループの助言のもと、想定されるキャリブレーションの手法や精度をまとめる。

MWA[44, 45] や LOFAR[46] などの先行機によってこの 10 年で 21 cm 線観測への理解とソフトウェア開発が進展している。装置の広い視野に対応するために先行機の較正は、巨大な電波カタログを元に視野の中の天体のモデルを作成してセルフキャリブレーションを行う (キャリブレーションソフトウェアの例: RTS [49], FHD [50], SageCal [51])。SKA1 Low でも同様の手順が取られると思われる。SKA1 Low の視野は 20 平方度及び、キャリブレーションには全天の電波源の情報を記載したカタログが必要になる。例えば、MWA の再電離期 21cm 線の解析で用いているカタログは MWA 自身による南天の広域サーベイ GLEAM や過去のカタログを元に電波天体のフラックス密度や位置、形状、スペクトルの情報で構成されている。SKA1 Low でも同様のカタログが必要になるだろう。ただし、常に全天の天体をモデル化してキャリブレーションするのではなく、キャリブレーションや連続波の除去には全天の天体を全て使わず、アンテナビームによる重み付けを行ったあと、数千から数万の天体を選んでキャリブレーションモデルを作成する。このように作成されるモデルは観測視野や周波数帯域などによって変わる、MWA ではこのような手法を用いて非常に短い時間間隔でキャリブレーションを行う。また、前景放射の影響を軽減するために 21 cm 線の観測は銀河系中心から離れた領域を中心に行われると予想される。較正で大スケールの情報が必要な場合は、銀河系由来の広がった電波放射のモデルも必要になる。特に、[52] によると、Direction Dependent キャリブレーションの際、広がった信号のモデルがないせいで信号損失を起こす可能性が指摘されている。

広範な電波カタログ: キャリブレーションの際にカタログや装置のモデルに誤差があるとその誤差が最終的なイメージングノイズまで伝搬し、21 cm 線の撮像の妨げになる。例えば、キャリブレーションに用いるモデル由来のエラーは容易にイメージングノイズを生む。[48] など現状の想定では、モデルのフラックス密度に関して 35dB 以上の精度が求められている。MWA による南天の電波カタログ (GLEAM survey [53]) は SKA1 Low の観測周波数や観測領域をカバーしているが、既存の電波カタログの精度は SKA 時代の要求値に達成していないため、GSM は SKA 自身の観測を元に順次アップデートする必要があるだろう。

キャリブレーションエラー: キャリブレーション後の要求値として、SKA1 Low は spectral gain に関しても 3 桁以上の精度を求めている。また、[54] では SKA1 Low で 21 cm 線のパワースペクトルやイメージングを達成するために必要なゲインキャリブレーションエラーの精度を解析的に検証している。これによるとパワースペクトル観測にはバンドパスの振幅に関して、150MHz の観

測で 1MHz ごとに 0.5%の精度が求められる。また、イメージングを達成するためには、全 station の位相の変動に関して root-mean-square が 0.2deg 以下である必要がある。

1000 時間積分の検証：最終的に 1000 時間分の観測データを積分し、イメージのノイズを熱雑音レベルまで下げることで、再電離期 21 cm 線の直接撮像が達成できる。ただし、その検証は容易ではない。1000 時間分のイメージの積分は SDP で必ずしも行われるのではなく、保存されたイメージを後段の SRC での解析でユーザーが積分して検証することになる可能性がある。ただし SDP には、キャリブレーションや天体の差し引きに関して、1000 時間積分を達成できる精度が要求される。

Direction Dependent Effect：ビームや電離層などの Direction Dependent Effect(DDE)の補正は高精度な前景放射除去に必要不可欠である。DDE に関する要求として、L1 要求文書によると、例えば、Aperture Array のビームモデルに関して、メインビームで 35dB の精度をもったモデルが必要とされる。ビームのモデルは通常キャリブレーションとイメージングの両方に使用されるのでその精度は最終的なイメージの質に直結するだろう。さらに、SKA1 Low の周波数帯 (50-350MHz) では電離層による影響が顕著に現れる。電離層は数秒から数分の短い時間間隔で変動を起こすので、そのキャリブレーションは 10s 程度のタイムスケールで行っていく必要がある。こうした補正やモデルの作成には SDP の段階で電離層領域の電子柱密度 TEC(total electron content) の観測が必要になるかもしれない。

Far side lobe：SKA1 Low のビームの形状は電磁界計算を用いて推定されている。キャリブレーションの際、主ビームに加えて問題になるのは視野中心から 45 度以上離れた領域にあわられる far-side-lobe (FSL) である。[55] では、現状の SKA1 Low の装置モデルを用いて、定量的に FSL 中の天体を作るノイズを検証している。例えば非常に明るい天体が FSL 中にある場合、FSL 中の天体のシグナルが Point Spread Function を介して主ビーム内に伝搬し、ノイズのように働く (サイドローブ)。21cm 線観測のためにはこのような視野中心から離れた天体由来のサイドローブも低減されなくてはならない。一般に FSL のレスポンスは主ビームに比べて十分低く、天体の寄与は十分小さくなる。それでも SKA1 Low では -30dB から -45dB 程度のレスポンスを持つ。FSL を低減するためにビーミングの際の重みを導入することによって、FSL 由来のノイズが 100~500 時間積分後の熱雑音レベルまで下がることがわかっている。ビームの応答は装置で決まっているので、これ以上 FSL を下げるためには FSL 中の天体除去も行う必要があるだろう。

4.2 システム要件を満たすための課題・目標

4.2.1 SKA1

・ビッグデータの準リアルタイム処理

(前回の SKA-JP EWG レポートより引用・改変) SKA1 Low では 21 cm 線の観測として合計 15000 時間の大規模観測を想定している。この観測全ての uv データを保存するのはコスト的に現実的ではない。そのため、SKA SDP ではデータキャリブレーション後のイメージデータのみを残す戦略を予定している。イメージデータだけでも、現状想定されているデータストレージは 35PB になる。イメージだけを残すという戦略上、uv データを残す余裕がないと、観測された生データは準リアルタイムで処理されていく必要がある。MWA や LOFAR で行われているキャリブレーションは観測時間に対して約 10 倍の計算時間がかかっているという報告もあるため、キャリブレーションの高速化は SKA1 に向けた重要な課題である。[56] では LOFAR の基本キャリブレーションソフ

トウェア SAGECal を SKA1 Low に用いた際の計算コストを検証しており、基線数が 64 倍になるのに対して、CPU を用いると計算時間は 60 倍、GPU だと 20 倍程度に収まるという結果もある。今後は GPU を用いた計算を基本に開発が進んでいくものと思われる。

・半自動ながら堅牢な解析アルゴリズム

(前回の SKA-JP EWG レポートより引用・改変) 準リアルタイム処理を SKA1 Low のビッグデータで行うには、現在試験機で行われているように何度もパラメータを変えながらキャリブレーションを繰り返すようなことはできない。最適なキャリブレーションの設定やデータのクオリティを自動的に判断するアルゴリズムが必要になるであろう。実際に 21 cm 線検出に必要な長時間積分は SRC で行われる予定であるため、SDP の段階では 21 cm 線を検出できるレベルのキャリブレーションや画像化を行うことはないかもしれないが、それでも SDP の時点で非常に高い感度やダイナミックレンジ、高度な人工電波の除去などが要求される。こうした準リアルタイム処理に伴うパラメータの決定やデータ選別に向けて、SKA SDP には非常に知的なシステムを構築する必要がある。前回のレポートで示唆されたように、24 時間監視観測を行うような小型望遠鏡のノウハウや通信衛星やロボット工学などのいわゆる制御系の最先端技術に加え、人工知能による制御も役に立つかもしれない。

・高精度の電波カタログ

先に述べたように、キャリブレーションに要求される天体モデルには 35dB 以上の精度が求められている。SKA1 Low の低周波観測では主ビームと near-in sidelobe の視野が広い。さらに far-sidelobe に存在する電波天体由来のノイズの低減も必要である。そのため、SKA1 Low の観測のためには、全天の電波カタログが必要になる。また、FornaxA や PictorA などの非常に明るく、かつ広がった天体は、較正モデルに誤差があると、誤差由来の天体差し引き後のノイズが非常に大きくなる。こうした天体のモデルはより精密である必要があるため、SKA 時代に求められるほどの高精度なカタログの作成には、SKA 自身の観測を待つ必要がある。さらに、系外の電波源のみならず、銀河系由来の広がった放射のモデル化も必要である。これまで、主に高周波側で観測されてきた全天の広がった電波放射マップを用いた実験が行われてきているが、分解能や精度の部分でいまだ不十分である。

・ Direction Dependent Effect 較正の手法

Direction Dependent Effect (DDE) の補正も SKA1 に向けての重要な課題である。まず、Error Budget の資料によると、キャリブレーションやイメージングに必要なビームモデルの精度は 35dB であるとされている。SKA1 Low では基本的に 256 個のアンテナからなる station 512 台で構成され、キャリブレーションには各 station のビームモデルが必要である。現在までに MWA などの先行機を用いて電磁界計算による FEE model の開発 [57] や SKA prototype とドローンを使ったビームの計測、比較などが行われている。また、アンテナ同士の相互作用や station 中のアンテナの故障によってもビームの形は変動するので、そのような効果を高速かつ精密にモデル化できるソフトウェアの開発が必要になる。

他の DDE 効果として、地球の電離層由来の影響が懸念されている。クエーサーなどのシグナルが電離層によって屈折を受け、見かけの位置が変動することで、キャリブレーションのモデル精度が悪化する。電離層は数分から数秒のタイムスケールで変動するため、非常に短い積分時間ごとに補正を行う必要がある。例えば、既知の天体の位置情報と見かけの位置 (あるいはビジビリティの位相) を比較することによって、明るい天体方向での電離層由来の誤差は修正できる。ただし、信号雑音比の問題で、補正できる方向が制限される。LOFAR や MWA を中心に電離層の補正方法が検証されているが、現状の手法の精度は未だ不透明である。今後は、比較的暗い天体の位置で

の電離層補正手法の開発と精度の検証が必要になる。

・人工電波の除去

人工電波はキャリブレーションの精度を下げる要因の1つである。SKA1 Low の置かれる MRO は、人工電波による汚染の非常に少ない地域であるが、近郊の都市由来の FM ラジオ、デジタルテレビの影響がある。また、人工電波は飛行機や衛星、隕石の反射によって天球面の様々な方向から電波観測に寄与している。現在の人工電波解析ソフトウェアは AOFLAGGER[58] が MWA や LOFAR で使われており、SKA でも用いられるであろう。また、MWA の観測データを用いた解析で DTV など微弱な人工電波の除去の必要性が明らかになっている [59]。RFI のパワースペクトルへの影響はまだ明らかではなく、1000 時間積分後のイメージにどのような影響を及ぼすかは不透明である。今後は RFI の分類、予測、モデル化、より暗い RFI の除去など様々なソフトウェアの開発が必要になる。

・その他

1000 時間積分後にイメージノイズを熱雑音レベルまで下げる際、キャリブレーションに加え、SKA1 Low の station が作る far-side-lobe の影響も考慮する必要がある。通常は非常に遠方の far-side-lobe にはほとんどレスポンスがなく、遠方の天体はキャリブレーション中で無視できる。しかし、21 cm 線が非常に微弱であることに加え、SKA1 Low の広く強いビームレスポンスによって視野中心から数十度離れた天体でさえキャリブレーションモデル中で無視できずイメージングの前に除去しておく必要がある。ステーションのアンテナ配置のランダム化やビーミングの際の重み付けを行うとサイドローブの影響を軽減できることがシミュレーションで示されており、様々な戦略が取られると思われる [55]。

4.2.2 長期的展望

すでにオーストラリアの MWA やヨーロッパの LOFAR、インドの GMRT[60]、アメリカを中心にした HERA[61] など、各国で 21 cm 線による宇宙最電離期やそれ以前の時代の探査が行われており、低周波 21 cm 線の探査はますます今後の電波天文学の潮流の一つになっていくと期待される。近い将来、SKA1 Low による 21 cm 線の検出が達成されるとその動きはさらに加速されていくだろう。SKA1 Low は現在建設段階にあるため、将来計画である SKA2 での科学目標はまだ明確に決まっていないようだが、現状の国際 SKA サイエンスブック [39] にある今後の展望をまとめると、(1) パワースペクトルで 16 倍の感度を達成、(2) 小スケールのバブルのイメージング、(3) Cosmic Dawn ($z \sim 20$) のイメージング、(4) 極低周波 (Dark Age, $z=30 \sim 40$) の観測、などを目標にすると考えられる。

想定される必要な性能

・パワースペクトルで 16 倍の感度を達成するためには、アンテナのサイズ拡大もしくは、アンテナ数増加が必須になる。パワースペクトルに対する感度は基線密度に反比例するから (e.g. [62])、単純にはあるスケールに寄与する基線数を 16 倍に増やせばよい。実際にはアンテナのサイズなどを考慮した分布を考慮する必要があるため、アンテナ数を 4 倍以上に増やす必要がある。すると visibility でのキャリブレーションの計算コストは単純計算で 16 倍以上になる。SKA1 Low の段階でも巨大な計算機が必要であるとされているため、データ解析方法の抜本的改善や準リアルタイム処理の取りやめなど戦略を考慮するか計算機の飛躍的発展が必要になる。

・より小スケールのバブルを捕らえるためには長基線での感度向上が必要不可欠である。それに加え、イメージノイズを sub-mK レベルにするためにキャリブレーションやモデルの飛躍的な精度向上も必要になる。特に、長基線の観測では電離層の補正がいつそう難しくなる。こちらも、既存の手法を超えたキャリブレーションの方法を開発する必要が出てくるだろう。

・Cosmic Dawn の 21cm 線を撮像するのに求められる精度を簡単に見積もってみる。Cosmic Dawn 時期の 21cm 線は標準的なモデルでは 10 mK から 100 mK 程度の揺らぎを持っていると考えられる。一方で前景放射の揺らぎは 10 K 程度になると思えば、結局、校正後のゲインに求められる精度は 4 桁程度で、再電離期の 21cm 線撮像と同程度か少し厳しい要求になるかもしれない。ただし、Cosmic Dawn の観測は SKA1 Low の周波数帯域の中でも低周波側 (70 MHz から 100 MHz) で行われるため、再電離期の観測に比べて SKA の主ビーム、サイドローブが大きくなる。さらに、雑音の影響が非常に大きく、ゲインの校正は困難を極める。また、地球の電離層の影響も周波数の 2 乗で強くなるので、前景放射除去および校正にはより精密な取り扱いが求められる。

・Dark Age($z=30\sim 40$) の観測のためには 35-45MHz の範囲まで観測可能帯域を変える必要が出てくる。暗黒時代は天体が生まれる前の時代なので、当時の 21cm 線は天体物理的な効果を受けていない純粋な宇宙論的效果が反映されていると期待できる。ただし、電離層による吸収・反射の影響があるのでそもそも地上からの観測が適切か検証していく必要がある。例えば、暗黒時代の 21cm 線を捉えることを目的の一つとした計画として、地上ではなく月の裏側に簡素なアンテナを配置して 21cm 線のグローバルな信号を捉えようとする計画がある (e.g. DAPPER¹)。

SKA2 に向けて今考えられる課題

・低周波の詳細観測

前景放射や熱雑音の増加、主ビームの拡大に伴う前景放射除去対象の天体数増、分解能の低下に伴う confusion noise の増大、電離層など DDE の悪化、電離層の非線形効果などの問題が考えられる。キャリブレーションや前景放射除去、電波カタログの精度向上はもちろん、新しい手法の開発が必要になるだろう。

・電離層補正手法の開発

これまでの研究では電離層の補正には線形近似によるキャリブレーションが行われているが、Cosmic Dawn や Dark Age の低周波の観測では Faraday Rotation など非線形項の効果が顕著になる。これらの影響を正確に取り除く手法はまだ開発されておらず、先行機や SKA1 での実験が必要である。

・高速なキャリブレーションソフトの開発

感度を上げるために、基線数が増加し、それに伴って計算コスト(データ量)の増加が起こる。SKA では準リアルタイムでのデータ処理が求められているが、仮に基線が 16 倍になった場合、計算コストも線形に増え得るだろう。また、より詳細なキャリブレーションのために広範囲の電波天体をモデルに取り込む必要がある。こうした大規模キャリブレーションを高速で達成するために、GPU や人工知能、機械学習などを用いた高速なソフトウェアの開発が重要になる。

4.3 日本の経験（開発・準備状況）と計画

LoW EoR subEWG では再電離期 21 cm 線観測を目的に行われるキャリブレーションの新しい手法を開発し、SKA SDP や SRC の高精度データ解析に貢献する。以下では現状の経験と今後の具

¹<https://www.colorado.edu/project/dark-ages-polarimeter-pathfinder>

体的な計画を記す。

4.3.1 先行機を使った研究

これまでに MWA に参加しているメンバーを中心に SKA1 Low の先行機である MWA を用いたデータ解析やソフトウェア開発を行ってきた。例えば、Cosmic Dawn に相当する超低周波のデータ解析では広範囲のキャリブレーション モデルの必要性を明らかにし、地球の電離層補正の誤差などを評価してきた [63]。そのように MWA の既存の手法の精度を評価、改善する方法を研究しており、SKA1 時代に本格的に Cosmic Dawn 観測が行われた際の重要な足がかりとなるだろう。

4.3.2 現状のソフトウェアの改善

現状、MWA や LOFAR などの先行機では様々なソフトウェアが開発・利用されている。たとえば、キャリブレーションには RTS[49], FHD[50], Segcal[51], RFI 検出には AOFLAGGER[58], イメージングには WSCLEAN[64] などのソフトウェアがある。特に、SKA1 Low の解析には GPU を用いた高速なアルゴリズムが重要になる。LoW EoR subEWG ではこれらのソフトウェアを独自で解析・改善し、SKA 時代に耐え得るものかどうか、アルゴリズムの検証・実験・開発を行う。すでに GPU を備えた計算機に RTS, AOFLAGGER, WSCLEAN をインストールして、開発に向けた環境を整えた。

4.3.3 新しい解析方法の提案

本 EWG では、電離層補正、RFI 検出と前景放射除去のそれぞれについて新しい解析方法を検討・開発する。

a, 電離層補正

地球の電離層による屈折によって、入射波の位相がずれる。電波干渉計では位相のズレは見かけの位置のズレに相当する。この見かけの位置のズレはキャリブレーションと前景放射除去の両方に影響する。キャリブレーションでは系外電波源のカatalogを元にキャリブレーション用のモデルを作るが、見かけの位置がずれることによって精度が落ちる。前景放射除去の際も天体カatalogを使うが、特に非常に明るい天体に関してわずかでも位置のズレがあると 21 cm 線よりも明るい残渣を残してしまう。

上記のような問題を軽減するために、電離層の補正やモデル化は必要不可欠である。現状の電離層補正はカatalogの位置と見かけの位置を比較し、その位相を補正することで行われている。しかし、この方法の精度は信号雑音比で制限されてしまい、一部の明るい天体を除き、適切な補正ができない。また、補正すべき天体数が増えるほど計算コストがかかる。電離層の補正は数秒のタイムスケールで行う必要があるため、計算コストを落としつつ、暗い天体にも適応できる方法が必要である。

この問題を解決し、最適な電離層補正を行うために、本 EWG ではニューラルネットワークを用いた電離層推定法を開発する。ニューラルネットワークでは入力と出力の非線形な関係を学ばせることで、ある入力から汎用的に出力を推定する。ここでは、入力を”視野内の明るい天体の位置での電離層由来の位置のズレ”として、出力を”視野全体の電離層の分布”とする。この方法によっ

て大スケールの電離層の分布を推定し、視野内全ての天体に対して見かけの位置の補正を行う。また、時系列的な入力を元にして、より細かい時間分解能での補正などを可能にする。

b, RFI 検出

人工電波 (RFI) も 21 cm 線の観測の課題の一つである。SKA1 Low の建設される MRO は非常に RFI クリーンな地域であるが、すでに MWA などの観測からデジタルテレビ (MHz) や FM ラジオ (MHz) さらには衛星 (MHz) などの RFI が無視できないことがわかっている。AOFLAGGER ([58, 65]) など広く利用されている RFI 検出ソフトウェアもあるが、その性能は完全とは言えない。最近ではデータを積分したときに現れる暗い RFI の検出ソフトウェアの開発も行われている (SSINS, [59])。

SSINS では感度を上げるために全ての基線を足し上げている。そのため、データに RFI が見つかり、そのデータそのものを全て解析から取り除かなければならなかった。そこで、各基線の時系列方向の情報と RFI の作るであろう非ガウス性に注目して、さまざまな統計量を用いた RFI 検出を目指す。例えば時系列データを見た際、特定の周期を持つような RFI (ビーコンなど) は対応する波数でパワースペクトルのピークを持つので検知が可能であろう。Low EoR subEWG では、MWA の観測データを用いて本手法の実験的解析に取り組む。

他にも未検出の RFI が SKA の 1000 時間積分後、イメージングにどれほど問題になるのか、パワースペクトル (EoR 窓内) への影響はどの程度など、定量的な検証はまだ途上である。本 EWG では、RFI の 21 cm パワースペクトル観測への影響を定量的に検証する。また、MWA の観測データを基にして過去に同定されていない暗い RFI の検証と分類・機械学習を用いた RFI 同定などに取り組んでいく。

c, 前景放射除去

宇宙再電離期の 21cm 線観測において、銀河系や系外銀河のシンクロトロン放射などの前景放射の除去は最重要課題である。先に紹介した EoR window のように前景放射の影響を回避する方法はパワースペクトルの検出に向けては非常に強力だが、SKA1 Low の目標である 21cm 線の直接撮像には前景放射の除去が不可欠である。前景放射除去の手法には様々な統計的な方法が提案されている。最も簡単な仮定は前景放射のスペクトルが完全に滑らかであると仮定した上での多項式近似がある。他にも主成分分析 (Principal component analysis, PCA), 独立成分解析 (Fast independent component analysis, FastICA, [66]), Generalized Morphological Component Analysis (GMCA, [67]), ガウス過程回帰 (Gaussian process regression, GPR, [68]) など様々な統計的手法を元に、前景放射除去が試みられている。例えば最新の LOFAR のパワースペクトル解析論文では GPR が用いられている [69]。

日本でもすでに検討を始めている。これまでに MWA のデータを用いたパワースペクトル解析の経験 [63] があるので、本 subEWG では MWA の観測データに対する前景放射除去の検討を行う。現在、観測シミュレーションの作成を行い、観測される 21cm 線や前景放射の現実的なモデルを作成し、既存の前景放射手法の実験を行っている。メンバーには CMB 観測における前景放射除去の経験者もいるので、FastICA、GMCA、GPR など複数の手法を組み合わせ、MWA や SKA1 Low に向けた前景放射手法の最適化を行っていく。

著者一覧 (○は編集責任者)

赤堀卓也 (国立天文台)
河野裕介 (国立天文台)
島袋隼士 (云南大学)
高橋慶太郎 (熊本大)
竹内努 (名古屋大)
長谷川賢二 (名古屋大)
箕田鉄兵 (名古屋大)
○吉浦伸太郎 (国立天文台)
伊東拓実 (熊本大)
宮元龍之介 (熊本大)

第5章 UHF帯広帯域受信機

執筆: UHF検討WG

5.1 UHF帯観測に関するSKAのデザイン

5.1.1 はじめに

UHF帯域(300 MHz – 3000 MHz)はSKA1 MIDで最優先のバンドに選ばれているBand 2を含んだ、SKA計画の花形の観測周波数帯である。HI(静止系で1420MHz)の赤方偏移した輝線で遠方の銀河までを調べるために究極的な感度が求められ、直線偏波で磁場を調べるためにかつてないほど高精度な偏波分離度が必要である。そして大規模なサーベイを達成するために、広い視野が求められている。

SKA計画の第一期SKA1では、概ね2010–2015年頃に確立されていた技術でこの周波数帯域の受信機の設計がなされた。具体的には、高い開口能率や偏波特性の要求に答えるために、UHF帯はLOW(50 MHz – 350 MHz)、MID Band1(350 MHz – 1050 MHz)、そしてMID Band2(950 MHz – 1760 MHz)の3つのBandに分けることとなった。また、予算の都合でSKA1の当初には実装されない予定のBand3(1650 – 3050 MHz)とBand4(2800 MHz – 5180 MHz)もデザインされている。LOWとMIDは独立した望遠鏡であるため、同時運用は可能である。一方でMIDは、それぞれのBandは独立したシステムになっており、受信機回転台(インデクサー)に離れて向きを変えて設置されるため、2つ以上のBandを同時に光学焦点面に向けることは構造上できない。

本節におけるUHF帯広帯域受信機とは、究極的にはUHF帯域(300 MHzから3000 MHz)を一度に網羅する、最大最小周波数比10の受信システムを構築することにある。バンドの定義にもとづけば、LOWの一部、MID Band 1とBand 2、そしてBand 3の一部を統合するシステムということになる。しかし、LOWとMIDは独立した受信システムであるので、MIDの最低周波数350MHzから最大最小周波数比10にあたる3500MHzまでを一度に網羅する受信システムを開発することが実際上の最終目標であり、この範囲内で一部を網羅する受信機を開発していくことが中間目標である。そこで、以降はMIDに焦点を当てる。我々の興味は反射鏡型(SKAではオフセットグレゴリアン型)アンテナの光学焦点位置に搭載するUHF帯域の広帯域受信システムの開発ということになる。

日本SKAコンソーシアムを結成した2008年頃では、電波天文学に耐えうる高い開口能率とシステム雑音温度をこれほど広帯域に達成する受信機は全く夢のような話であった。しかし、この10年の広帯域技術の進歩はめざましく、例えば米国のATA(帯域0.5 – 10 GHz, ピラミッド型対数周期フィードを採用)、豪州のParkes UWL(700 MHz – 4000 MHz, コルゲートフィードを採用)は既に運用に入り、欧州ではBRAND(1.5 GHz – 15.5 GHz, クアッドリッジフィードを採用)の開発が現実のものとして進む。低雑音増幅器(Low Noise Amplifier, LNA)に至っては、市販品で良好な

性能を持つものが既にある¹。故に UHF 帯広帯域受信システムは決して荒唐無稽ではなく、今後5年から10年にかけて現実的な開発目標と言える。

日本国内では、東北大学、名古屋大学、早稲田大学、電気通信大学、JAXA、NICT など様々な大学・研究機関で UHF 帯域の電波観測がこれまで行われてきている。UHF 帯域の開発はこれらの国内の研究開発の経験にも動機づけられたものであり、SKA への貢献を通じて、国内の研究にもフィードバックを得たいと考えている。

本章では、まず SKA1-MID の仕様をまとめる。一部は第1章と重複する。次に UHF 帯広帯域観測を達成するための課題と目標を、今後5年程度の SKA1 と SODP までを視野に入れた短期・中期的な視点と、10年以上の SKA2 を視野に入れた長期的な視点とに分けてまとめる。最後に日本で行ってきた開発経験と準備状況をまとめ、日本の UHF 受信機関連における参加貢献の計画案を示す。なお、帯域の要求は本来は科学目標により定めるべきであり、本節では厳格に UHF の周波数帯域を指定せずにまとめる。ゆえに 300 MHz よりやや低い周波数も、3000 MHz よりもやや高い周波数も、検討範囲に含める。

5.1.2 SKA1 の UHF 帯の技術仕様

MID 受信機およびインデクサー

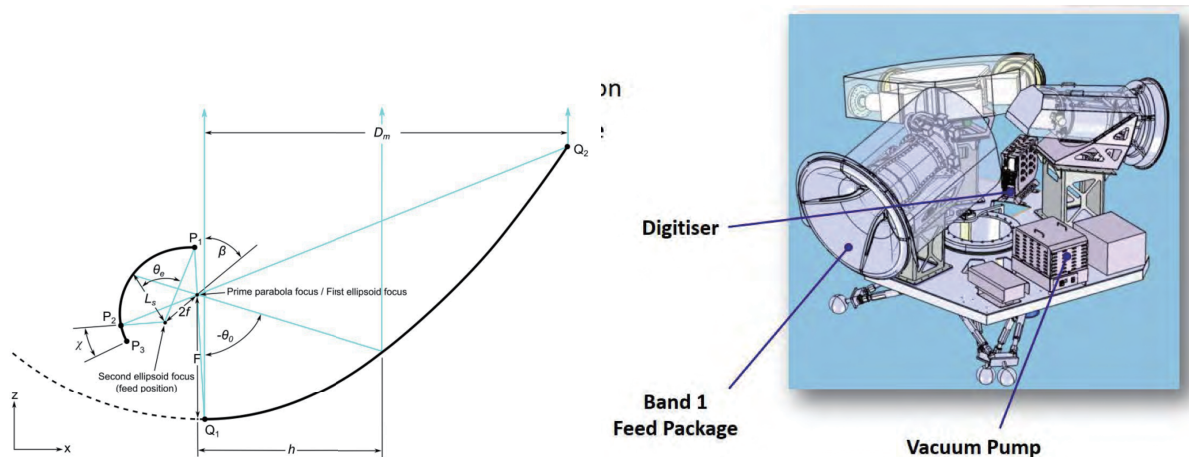


図 5.1.1: (左)SKA のオフセットグレゴリアン光学系のパラメータ。図の”Second ellipsoid focus (feed position)”位置に受信機が配置されるようにインデクサーが設置されている。(右)SKA MID のインデクサーと Band1 受信機および Band2 受信機。

図 5.1.2 左は SKA のオフセットグレゴリアン光学系のパラメータを示す。図の”Second ellipsoid focus (feed position)”位置に受信機が配置されるように SKA MID の回転式受信機台（インデクサー）が設置される。焦点から見上げた副鏡は国内で天文観測利用されているカセグレン光学系に比べて、非常に見込み角が大きいのが特徴である。

図 5.1.2 右はインデクサーと Band1 受信機および Band2 受信機を示す。インデクサーは3つのフィードパッケージと、2つのデジタイザ、さらには真空ポンプと電源、そして光ケーブルを支持し

¹たとえば Low Noise Factory: LNF-LNC0.2.3A は冷却時に $NF=0.03\text{dB}$, $T=1.7\text{K}$ 、常温でも 30K–40K 程度の性能を有するただし一声 100 万円程度と高額ではある。

ており、Band1 フィードパッケージ (給電部・OMT・LNA)、Band2 フィードパッケージ、Band3/4/5 フィードパッケージ、ADC パッケージ、真空ポンプ、電源系でなる。また、脱着可能な日除けと雨除けをつけることができる。なお、受信機台には 1MHz 基準信号が来ていないため、受信機台上でダウンコンバートをするには改修が必要であるが、UHF の帯域は基本的にダイレクトサンプリングで達成できるだろう。

インデクサーは副鏡の焦点位置に受信機が合わせられるように回転台となっている。それぞれのフィードパッケージは約 100 度離れて設置されており、回転台は 203 度回転することができる。インデクサーの重心はほぼ回転軸の近くにある。観測モードは 30 秒以内に切り替えることができるという科学要求 (SKA1-SYS.REQ-2133, アンテナ旋回時間は除く) に基づいて、受信機台の回転もその要求を満たすよう設計されている。

給電部

Band1 では 350MHz-1050MHz (比帯域 3:1) の観測が想定されており、かつ 2 偏波受信可能な給電部が要求されている。同要求を満たすために、Quad-Ridge Flared Horn (QRFH) の採用が検討されている (図 5.1.2 左)。全体的なサイズが大きくなることもあり、Band1 は完全に常温環境下での使用が想定されている。また、カナダのドミニオン電波天文台に設置されている SKA1-MID 試験機 (Dish Verification Antenna 1) に開発した QRFH を搭載し、ビームパターンの実測とシミュレーションの比較も行われている (図 5.1.2, [70])。

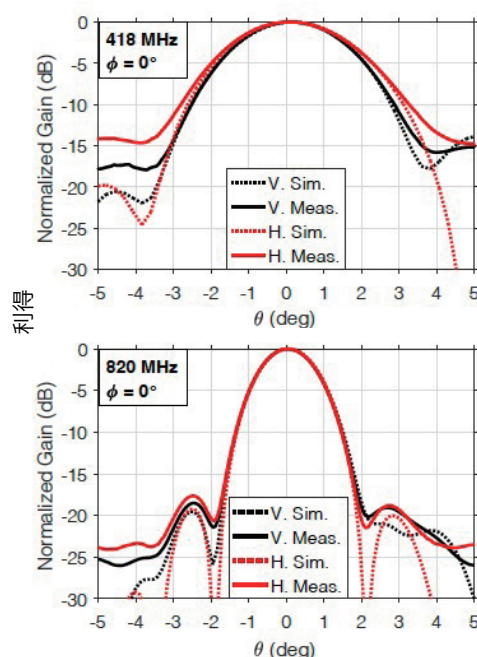
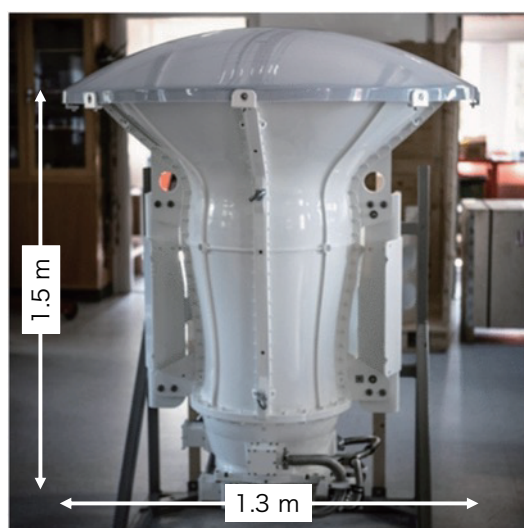


図 5.1.2: Band1 QRFH の形状 (左, [71]) および試験機に搭載した際に測定したビームパターンとシミュレーションの比較 (右) を示す。ビームパターンは 418MHz (上) と 820MHz (下) において期待される結果を示している [70]。

Band2 では 950MHz – 1760MHz (比帯域 1.85:1) の観測が想定されており、かつ 2 偏波受信可能

な給電部が要求されている。MeerKATで採用されているシステムをベースにした Wide flare axially corrugated conical horn が使用される予定である。同フィードのバイコンカル形状によって広帯域性の確保が可能である。

Band 3, 4, 5a, 5b (および6) は全てコルゲートホーンを採用予定であり全て両偏波受信が要求されている。Band 3/4 については具体的な検討は進んでいないが、Band 5a/5b については搭載計画の進んでいる。これらのバンドは Band 1/2 とは異なり、ホーンまでが 80K ステージで冷却され、OMT/LNA は ~12K ステージで冷却予定である [71]。

OMT

Band1 については QRFH より直交直線 2 偏波出力がされ、LNA へ入力される。すべて常温下でのシステム構成が想定されている。Band2 の OMT には MeerKAT/KAT7 同様のクロスダイポール形状のものが採用されている (図 5.1.2)。マーチャンドバランにすることにより、同軸の GND がアンテナになるため作りやすい。帯域特性についてはほぼ全ての帯域で反射損失 -20dB 程度以下を達成できている [72]。Band 5a では Quad-ridge finline design の OMT を、Band 5b は waveguide turnstile type のものを使用予定である。

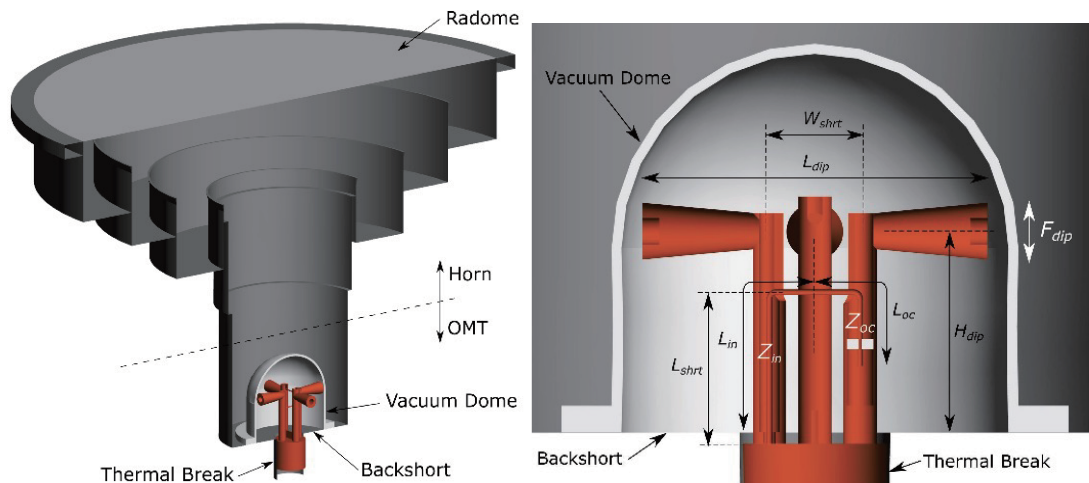


図 5.1.3: Band2 での採用予定の Wide flare axially corrugated conical horn (左) およびクロスダイポール形状の OMT 部を拡大した図 (右)。[72] より。

RF 周波数フィルタおよびアンプ

SKA1 のブロック図には RF 部での RFI 対策フィルタは入っていないことが確認できる。偏波分離後、LNA に接続される。Band1 (350 MHz – 1050 MHz) では、常温 LNA が使用される。フィードから LNA までの信号の損失を最小化するため、LNA は fin に設置される。Band2 (950 MHz – 1760 MHz) では、LNA は 20K ステージ上に設置され、20K まで冷却される。

LNA の開発事例として Low Noise Factory で開発された LNA の評価結果を図 5.1.2 と 5.1.2 に示す。Band1 用の常温 LNA では HEMT が採用され、350MHz から 1.05GHz の周波数範囲で雑音温度 10K, ゲイン 50dB が達成されている。Band2-5 用の LNA では、4つのバンド内 (950MHz から

13.8GHz) でゲイン 25-45dB, 雑音温度 4K 以下 (10K での計測)、S11 と S22 が -11 dB 以下 (常温での計測) の性能が達成されている。各バンド内のゲインの揺らぎは 2dB 未満となっている。

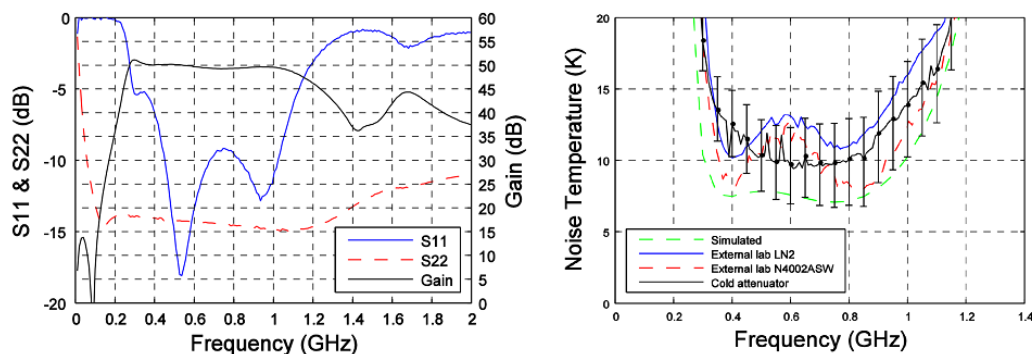


図 5.1.4: Band1 用に開発された LNA の評価結果。[73] より。

ADC

各バンドの偏波毎に要求される ADC のビット数は、バンド 1, 2, 3, 4, 5 に対して、それぞれ 8, 8, 6, 4 以上, 3 以上 (2 streams) であり (SKA1-SYS REQ-2190)、この要求仕様に適合するように ADC はデザインされている (表 5.1.1, 5.1.2)。ADC 系は、Band 1-3 系用の RXS123、Band 4,5 系用の RXS45 の 2 つの ADC パッケージ (デジタイザ) 内に搭載される (図 5.1.2)。これらの ADC パッケージは、インデクサーの Band 1-3 系、Band 4-5 系のフィードに近接して設置される (図 5.1.2(右))。ADC パッケージの開発は、RXS123 については National research Council (カナダ)、RXS45 については Bordeaux 大 (フランス) により主導されている [76, 77]。

表 5.1.1: Summary of Digitization for MID [75]

Band	Frequency (GHz)	RF BW (MHz)	Sampling Rate (GSps)	Nyquist Zone	ADC Sampling Bit Depth (bit)
1	0.35 - 1.050	700	3.96	1	8
2	0.95 - 1.760	808	3.96	1	8
3	1.65 - 3.050	1403	3.168	2	6
4	2.80 - 5.180	2380	15.84	1	4
5a	4.60 - 8.500	3900	8.91	2	3
5b	8.30 - 15.40	7000	15.84	2	3

冷却システム

冷却システムは Band 2 系と Band 3, 4, 5 系に用いられる (Band 1 系は常温 LNA が用いられる)。Band 2 系でフィードホーンは常温である一方、OMT、LNA については Gifford McMahon (GM) 型冷凍機

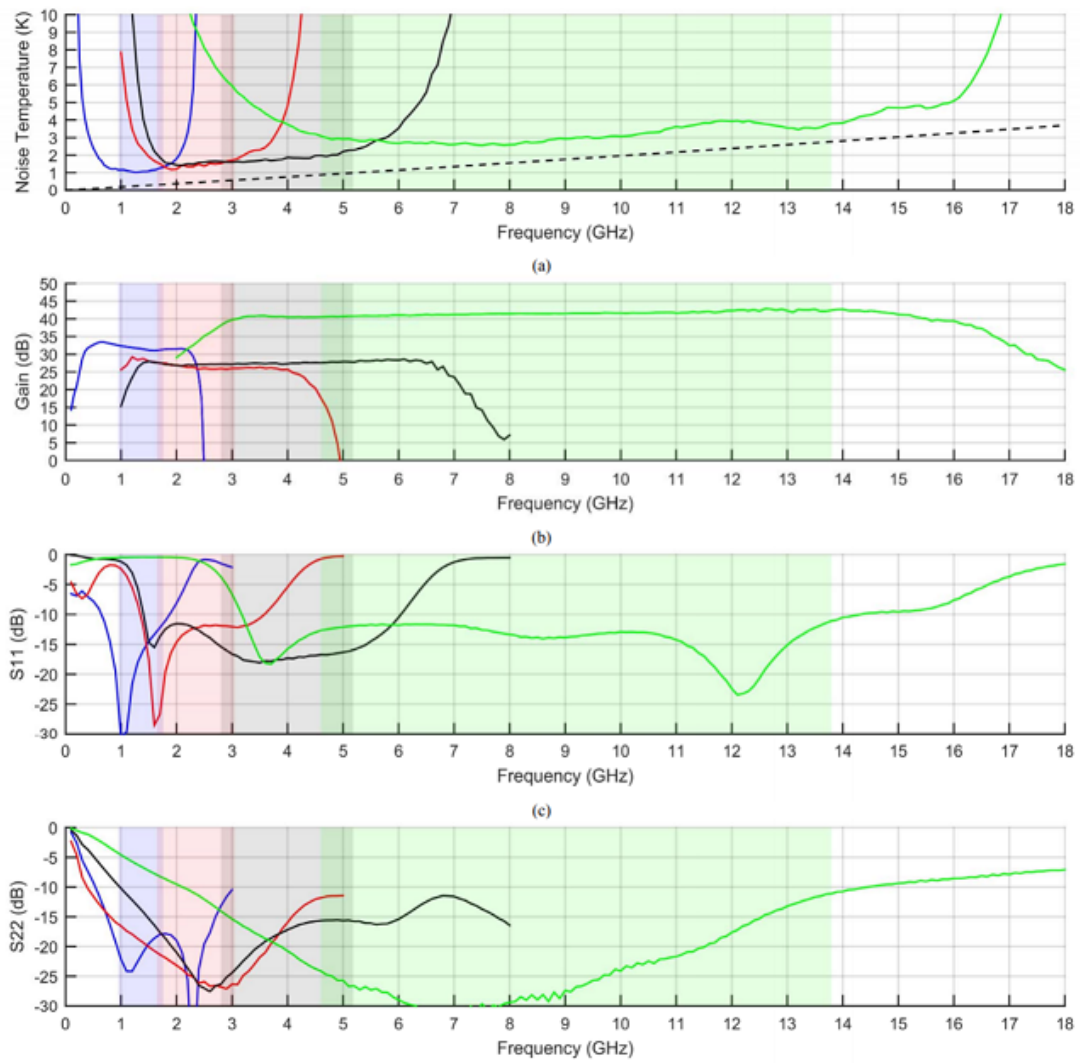


図 5.1.5: Band2-5 用に開発された LNA の評価結果。[74] より。

表 5.1.2: Summary of Digitization for MID: continued

Band	Transport Sampling Rate (GSps)	Transport Bit Depth (bit)	Transport Data Rate (Gbps)
1	3.96 [†]	12	95.04
2	3.96 [†]	12	95.04
3	3.168 [†]	12	76.032
4	5.94 [†]	8	95.04
5a	2x5.94 [†]	4	95.04
5b	2x5.94 [†]	4	95.04

[†] Offsets are added to these frequencies to reduce correlated noise.

である Oxford Cryosystems 社製 Coolstar 2/9 を用いて OMT 系は 70K 以下に、LNA は 20K 以下に保持される。クライオスタット内の冷却コンポーネントは高真空化により断熱される (図 5.1.7, 5.1.8)。尚、calibration 用の noise source もクライオスタット内に置かれるが、振幅変動抑制のための恒温安定機構が付加され、常温で使用される。Band345 系では、省電力のために各バンド共用の冷凍機として Oxford Cryosystems 社製 Coolstar 6/30 が 1 台のみ用いられ、Band 3,4,5a,5b,(6) の 5 系の冷却に第 1 段 (@80K) で 30W、第 2 段 (@10K) で 6W の電力が予定される。フィードホーンは第 1 段に直結され 80K に、OMT と LNA は第 2 段に接続される銅製の bus-bar に接続され 12K に保持される (図 5.1.9, [71])。

5.2 UHF 帯広帯域観測を達成するための課題と目標

本節では UHF 帯広帯域観測を達成するための課題と目標を、今後 5 年程度の SKA1 と SODP までを視野に入れた短期・中期的な視点と、10 年以上の SKA2 を視野に入れた長期的な視点とに分けてまとめる。

5.2.1 短期・中期的視点 (SKA1・SODP)

まず前節で解説したとおり、UHF 帯広帯域受信システムは SKA1 のデザイン外である。したがって、直ちに SKA1 で採用されて搭載されることは考えにくい。一方で、同システムの一部分については、SKA1 のデザインを大幅に変えないあるいは変えるが許容な範囲で、SKA1 に導入することができるのではないかと考えている。その根拠として国際的な 3 つの活動がある。

1 つ目は、SKA1 のスコープに含まれる SODP (SKA Observatory Development Program) である。SODP にはこれから SKA1 の建設が終了するまでの間に年間 4 百万ユーロ、建設終了後は年間 2-4 千万ユーロの予算が想定されている。この予算を使って、SKA2 に向かうよりも短い時間スケールで、SKA1 をアップグレードすることが想定されている。

2 つ目は、この SODP の有力な候補として、過去に AIP (Advanced Implementation Program) と呼ばれていた WBSPPF (wideband single pixel feed) の Band A (1.60 – 5.20 GHz) と Band B (4.6 GHz – 24 GHz) が俎上に載っていることがある。

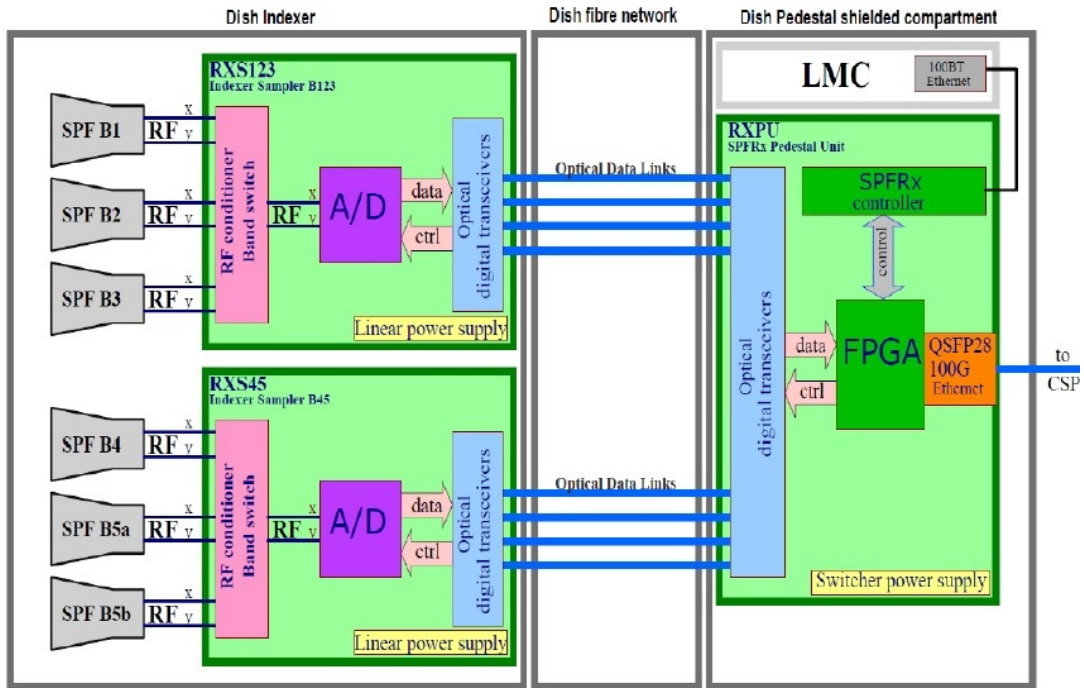


図 5.1.6: インデクサー上に搭載される2系のADCパッケージ (Band1-3系用のRXS123とBand4,5系用のRXS45) のシステムブロック図 [77]

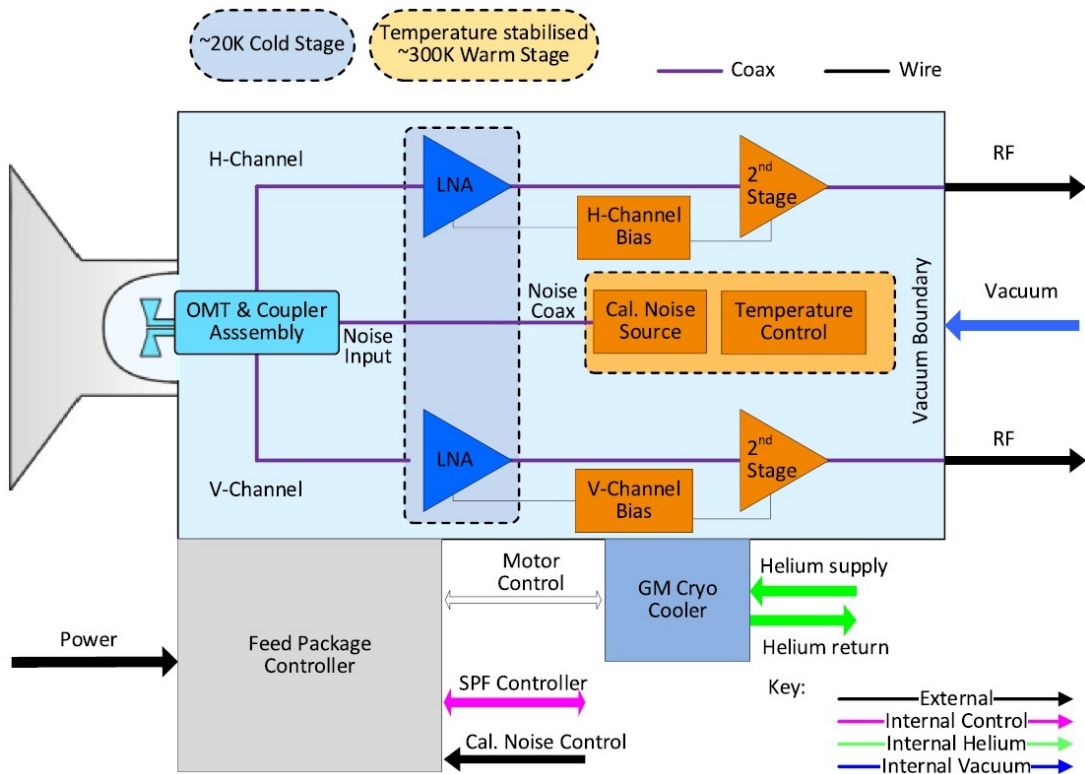


図 5.1.7: Band2系のシステムブロック図。LNAは20K以下に冷却される [71]。

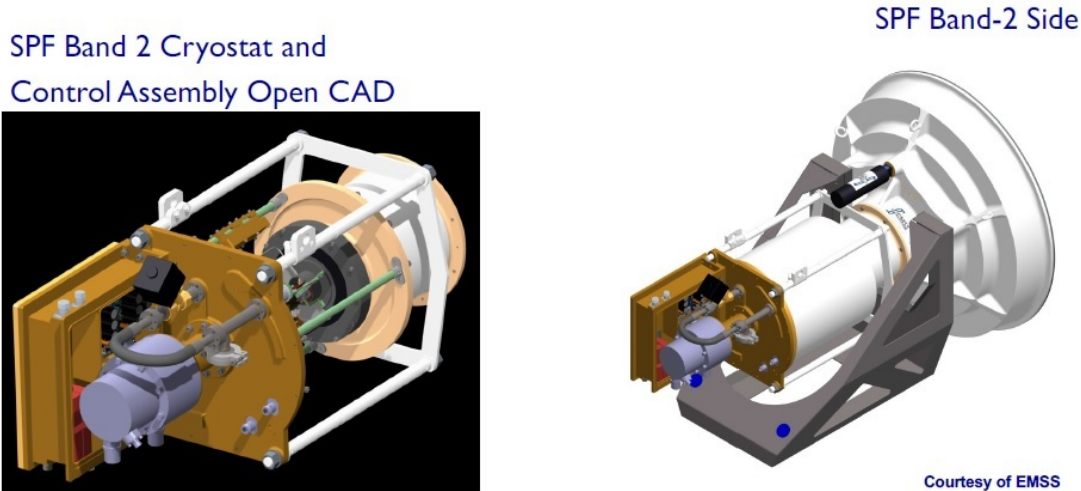


図 5.1.8: Band2 系クライオスタットと制御系 [76]。

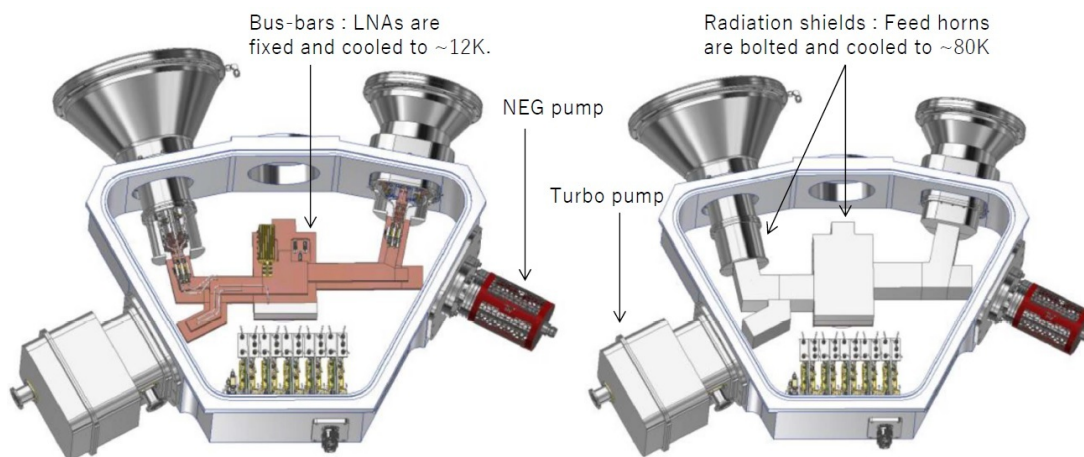


図 5.1.9: Band345 系クライオスタット内の冷却システム ([78] に追記)。

3つ目は、国際的な科学検討部会 (SWG) にて、サイエンス・ロードマップの検討が始まっている。これは SKA1 のどの性能をアップグレードすることでどのようなメリットが得られるのかを科学的見地から検討するものであり、SODP を睨んだものに他ならない。

以上の国際的な動向を踏まえて、SODP に日本から UHF 広帯域受信システムのうち、早期に実現可能な技術部分の提案を行うのはどうだろうか。以下では、その候補を挙げる。

Band 2 の拡張 (Band A+)

SKA1 MID Band 2 のサブシステムを改修し、Band 2 + 3 + 4 (~1 GHz から ~5 GHz) を取れるようにする開発が考えられる。これは国際的にはいわゆる Band A と呼ばれるコンセプトの派生である。ここで冷却方法は変更しない。Band 2 は ADC 以降で帯域幅に余裕があるため、当該の上限周波数の拡張をしても信号処理は変更なく可能と考えられる。もちろん信号処理の再プログラムなどが必要になるが、開発課題とリスクはフロントエンド部にほぼ限定される。フロントエンド、特に給電部での高周波側の感度拡大は、フィードを大型化する方向には向かないので、Band 2 カー

トリッジの設置スペースのまま活用はできると期待でき、同時に冷却能力(電力)も大きく余計に必要なとは考えにくい。LNAは昨今の製品がすでに十分に要求を満たしているため、広帯域化しても受信機雑音温度に影響はないだろう。そして、複数のバンドを統合することができれば、受信機台に新たなスペースを確保できるので、たとえばPAFの導入などの道筋も描きやすくなるというメリットが生まれる。

この拡張では、延長周波数において基本的にはBand 3やBand 4の科学要求を満たすように設計する必要がある。Band 3はBand 2と同等、Band 4はBand 2の約90%程度の感度要求($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$)があるため、開口能率とシステム雑音温度をあわせて、延長周波数で達成されなければならない。これが最も難しい課題となるだろう。より具体的には、高周波に延伸してもビームサイズを大きく収縮しないフィードデザインが必要である。ビームが光学系と一致しない場合、開口効率の中のフィード照射効率 $\eta_F = 0.92 - 0.04|\log_{10}(v \text{ GHz})|$ で損失が起こることになる。一方で、スピルオーバーによるシステム雑音温度への寄与(Band 2では概ね3K程度を想定している)は、ビームが小さくなれば少なくなるセンスにある。受信機雑音温度は広帯域化による一般的な問題が課題となるだろう。具体的には、給電部およびOMTでのインピーダンス整合が挙げられる。

Band 1の拡張 (Band UHF)

SKA1 MID Band 1を改修し、Band 1 + 2 (~0.35 GHz から ~1.76 GHz)を取れるようにする開発も考えられる。この場合、受信機は常温である。Band 1もADC以降で帯域幅に余裕があるため、当該の上限周波数の拡張をしても信号処理は変更なく可能と考えられる。高周波側の感度向上は、フィードを大型化する方向には一般に向かないはずなので、Band 1カートリッジの設置スペースのまま活用はできると期待でき、また冷却能力(電力)を心配する必要もない。このあたりは上述のBand 2の高周波への拡張と同じである。

この拡張で最も難しいのは、冷却するBand 2の感度を冷却せずに達成することであろう。具体的な数値では、SKA1のデザインでは、Band 1とBand 2が重複する周波数(1 GHz)で、1.68倍(あるいは約60%)の感度要求($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$)差があるので、システム雑音温度の向上が見込めない中、有効開口効率を1.68倍に高めることが求められる。これは一般にはほぼ不可能の域にある。一方で、同時周波数網羅性の観点で考えると、もしSKA1でBand 1とBand 2を同時に観測したい場合、アレイを半分に分割したサブアレイが余儀なくされる。これと比較をするならば、現アレイは開口総面積が半分(50%)になるので、この感度ロスと、常温のBand 1 + 2の感度劣化(約60%)とで比較をした場合、感度の差はかなり縮まることになる。そして後者はuv網羅性で上回ることができる。

上記の算段を成り立たせることは、Band 1の最高周波数で達成されている感度を、延長周波数においても満たすという要求に帰着する。この場合、前節の議論と同じく、開口能率とシステム雑音温度をあわせて、延長周波数で達成されなければならない。この要求は十分挑戦的であるが、Parkes UWLを2倍増にスケールアップすると350 MHz – 2000 MHzとなりBand 1 + 2を網羅できることを考えると、決して不可能な課題ではないといえるだろう。

あるいは全く新しい視点では、Band 1も冷却してしまうという大胆な変更もあるかもしれない。その場合、現在のデザインは大型なので、このままでは冷却能力に大きな負担があり、冷凍機から変更するような大きな改修が必要となってしまふ。そこでまず考えられるのは、現在のデザインを完全に捨てて、小型でコンパクトかつ広帯域特性に優れたフィードを新規に設計することが考えられる。もし冷却できるのであれば、現行のBand 1よりも一般論としては受信機雑音温度で

有利になる²。2010 年前後、自己補対アンテナ型のイレブンフィードが、UHF 帯のフィードデザインの候補として挙げられたことがあった。結果として採用には至らなかったが、イレブンフィードは良好な広帯域特性を持ちつつ、かつ比較的小型で軽量のデザインを実現できる可能性がある。例えばスウェーデンの Chalmers 大学が設計したイレブンフィード³は、0.40 – 1.5 GHz の受信帯域で -10dB のビーム半幅が 62 度、サイズが直径 745 mm、深さ 241 mm と、大変コンパクトである。図 5.2.1 には電磁界シミュレーションの結果を示す。

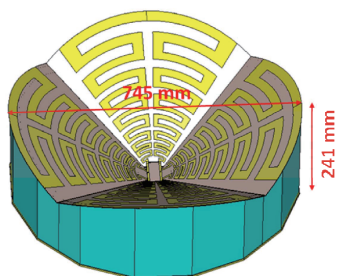


Figure 3 Geometry of Eleven feed as a candidate for SKA Band1

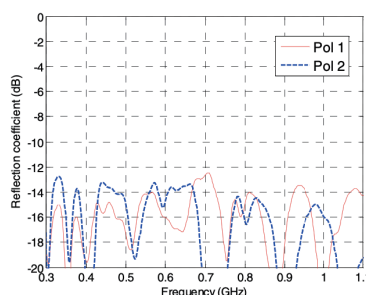


Figure 4 Simulated reflection coefficient

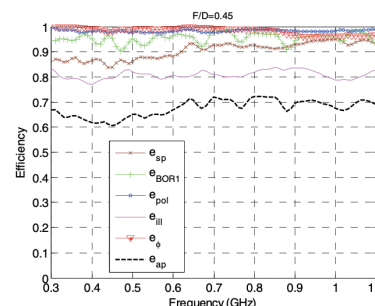


Figure 5 Simulated aperture efficiency

図 5.2.1: SKA MID Band 1 用のイレブンフィードの概念検討。

高温超伝導フィルタ (High-temperature superconducting filter: HTSF) の追加

SKA-MID が展開される Karoo は電波静穏地区として管理されており地上波からの電波干渉はほとんど無視できる一方、ケープタウン-ヨハネスブルク間の航空路下にあたり、航空無線からの電波干渉が懸念されている。SKA-Mid の観測周波数帯で航空無線に使用されている周波数は、航空無線航行 (DME/TACAN) で 960-1215MHz、電波高度計などの航空無線航行で 4200-4400MHz、航空機からの衛星携帯電話利用などで 5000-5150MHz などであり、うち 1090MHz、1140MHz で実際に電波干渉が計測されている (図 5.2.1 左)。図 5.2.1 右には、SKA 機構が Karoo サイトで 2017 年にモニタリング調査した RFI の広域スペクトルを示す。このように、SKA-MID の受信周波数帯は他の無線業務との周波数共用は避けることができない。ゆえに、特に強い干渉波は、周波数フィルタにより遮断されることが望ましい。なお、後述するような大強度の RFI はサイトでは少ないと見込まれるが、将来の SKA2 への拡張や、SKA-VLBI での他局において、RFI の遮断は重要な課題である。

初段 LNA に強力な干渉波が入力されると、LNA の非線形特性によって多くの高調波スペクトルが発生する。ゆえに初段 LNA の前段で干渉波を除去すれば、スプリアスも含めて干渉波の影響を取り除くことができるため、干渉波除去効果が最も高い。ここで問題は、優れた周波数遮断特性を持つ多段のフィルタは挿入損失が大きいため、初段 LNA の前段に一般的なフィルタを設置すると受信信号を減衰させるだけでなく、受信機雑音温度が増加するために受信機感度が大幅に劣化する。

²ただし、Band 1 は冷却しても受信機雑音温度があまり変わらないという話を聞いたことがある

³https://www.researchgate.net/profile/Jian_Yang18/publication/286663628_Preliminary_design_of_eleven_feed_for_SKA_band_1/links/57a44ae608ae3f45292938bf/Preliminary-design-of-eleven-feed-for-SKA-band-1.pdf

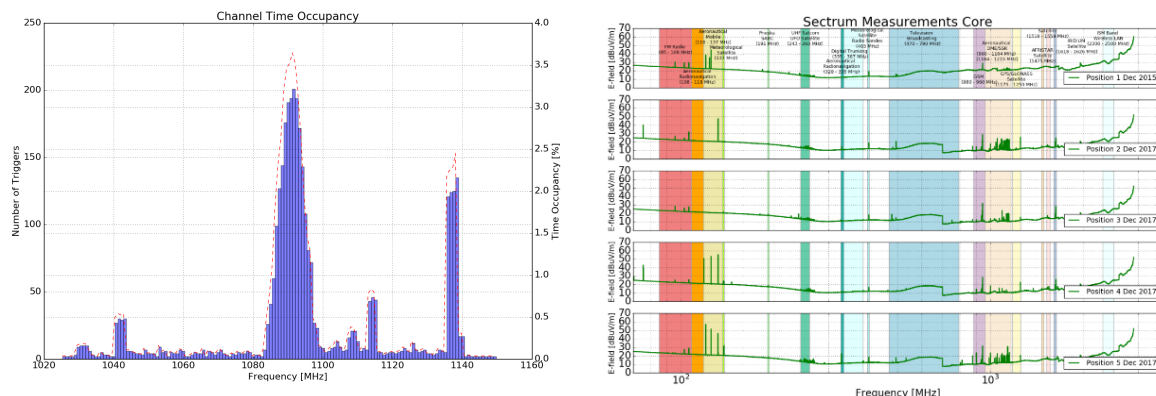


図 5.2.2: (左) 航空無線による電波干渉。(右) Karoo サイトにおける RFI のスペクトル。

高温超伝導体は液体窒素温度 (-196°C) まで冷却することで、銅などの従来金属と比較して高周波損失が3桁以上低い物性を示す。そのため高温超伝導体を使用した干渉波抑圧フィルタは、構成する共振素子の段数を増やしても挿入損失が抑えられ、従来技術では達成できない急峻なカットオフ特性、低損失特性、マルチバンド対応といった自由な周波数選択性などの長所を持つ。超伝導フィルタは、フィルタを構成する素子の抵抗がほぼゼロになることから、フィルタの段数を増やしても挿入損失への影響が非常に小さい。従って初段 LNA の前段にフィルタを設置しても受信機の感度を劣化させることはない。素子抵抗がゼロになることからフィルタを構成する共振器の Q 値が高くなり、フィルタの遮断特性も大幅に改善される。

高温超伝導体 (YBCO 薄膜) を使用した HTSF は、素子の冷却温度が 80K 程度で良いため、20K 以下に冷却する従来の大型・大消費電力の冷凍機が不要で、スターリングサイクル型の小型・軽量・低消費電力の冷凍機で冷却できる。またフィルタ単体の寸法も小さいため、既存のフロントエンドへも追加導入できる可能性がある。そこで Band2 受信機へ HTSF の導入が可能か、実際にフィルターモジュールを設計し検討した。図 5.2.1 左に HTSF の想定導入箇所を示す。受信機のカップラと初段 LNA の間が設置個所の候補となる。初段 LNA は 20K に冷却されている。カップラとの接続ケーブル部は環境温度は多少高い恐れがあるが、HTSF は 80K 以下であれば特性を発揮できる。また HTSF はパッシブ回路であり自身は発熱しない。そのため新たに冷凍機を設けたり、冷凍機の性能を増やすことなく本設置位置で使用できると判断する。図 5.2.1 右に受信機の内部構造を示す。今回設計した HTSF モジュールを追加するための余地は十分確保できると判断した。

今回設計した HTSF モジュールの外観を図 5.2.4 左に示す。寸法は、case1 で幅 24mm、奥行き 63mm、高さ 16mm、case2 で幅 36mm、奥行き 57mm、高さ 16mm と非常に小型な形状を達成している。図 5.2.4 中に Band2 受信機用に設計した HTSF の通過特性シミュレーション結果を示す。阻止周波数は RFI の計測報告を基に 1050-1150MHz とし、減衰量はそれぞれ 20dB 以上、40dB 以上の 2 種類を設計した。挿入損失はフィルタ部分が阻止域の減衰量にも依存するが 0.1 から 0.2dB 以下、SMA 入出力コネクタが 0.3dB 以下であり、観測に必要な帯域を低損失で通過させ、干渉波の周波数帯を急峻に減衰させる特性となることを確認した。

最後に、今回設計した HTSF モジュールの仕様を表 5.2.4 右に示す。今回は受信機への搭載可能性を検討するためフィルター仕様は簡素化しているが、具体的な導入を検討する段階になった時は実際の RFI 状況に即した設計修正が必要になる。また今回は 1ch の入出力を仮定した。こちら

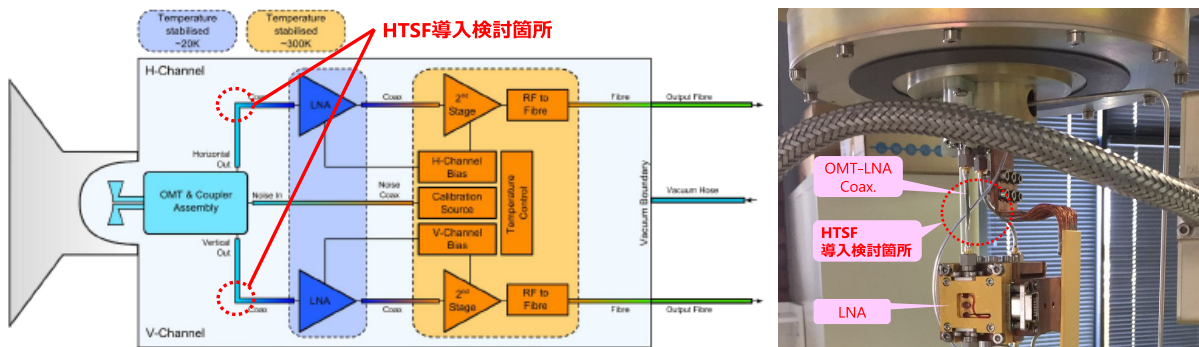


図 5.2.3: (左) 受信機ブロック図と HTSF の想定導入箇所。(右) 受信機の内部構造と HTSF の想定導入位置。

も要望に応じて 2ch に集約したモジュールの設計も可能である。また、初段 LNA と HTSF を一つのモジュールに合体する構成の提案も可能である。この場合は両者を合わせた寸法をよりコンパクトにすることができ、さらに HTSF と初段 LNA の間のコネクタを削減することができるため、HTSF を追加することによる挿入損失の増加を抑える効果も期待できる。

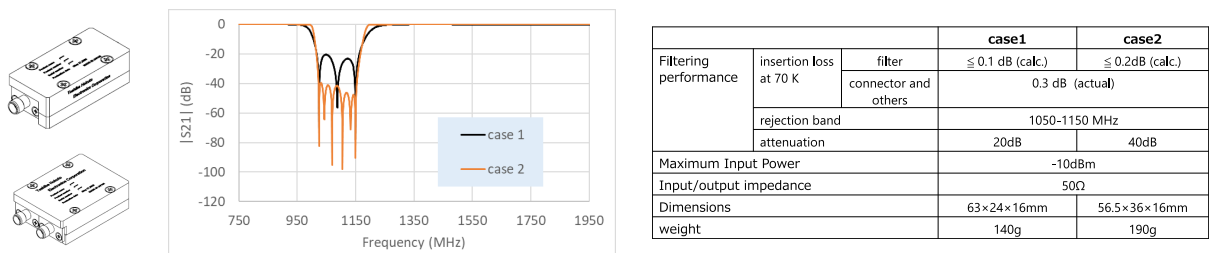


図 5.2.4: (左上)HTSF モジュールの外観 (case1)、(左下)HTSF モジュールの外観 (case2)、(中)HTSF の周波数特性シミュレーション結果。(右) Band 2 受信機向けに一次設計した HTSF の仕様表

5.2.2 長期的視点 (SKA2)

この小節では MID のアンテナ数が 10 倍増される、あるいは MFAA (Mid Frequency Aperture Array) が建設されるフェイズを SKA2 とする。SKA1 のデザインは SKA2 への拡張を予期して検討されてきたが、少なくとも 10 年は先の計画であることを考えると、より良いデザインの検討と提案の猶予はまだ十分あると考える。特に SKA1 と比べて規模が 10 倍となることで、わずかな効率の改善が全体として大きな効果を生む点は注目すべきである。

MFAA

Mid Frequency Aperture Array (MFAA) は、SKA2 での建設を目指している図 5.2.5 のような 1 GHz 帯の中周波アンテナアレイのことである。MFAA は LFAA と同様に、図 5.2.5 のように小さな素子アンテナを地面に敷き詰めてビームフォーミングすることにより、広い視野を複数画素で観測するというアンテナアレイである。MFAA は SKA2 での建設を目指しているが、SKA1 から建設さ

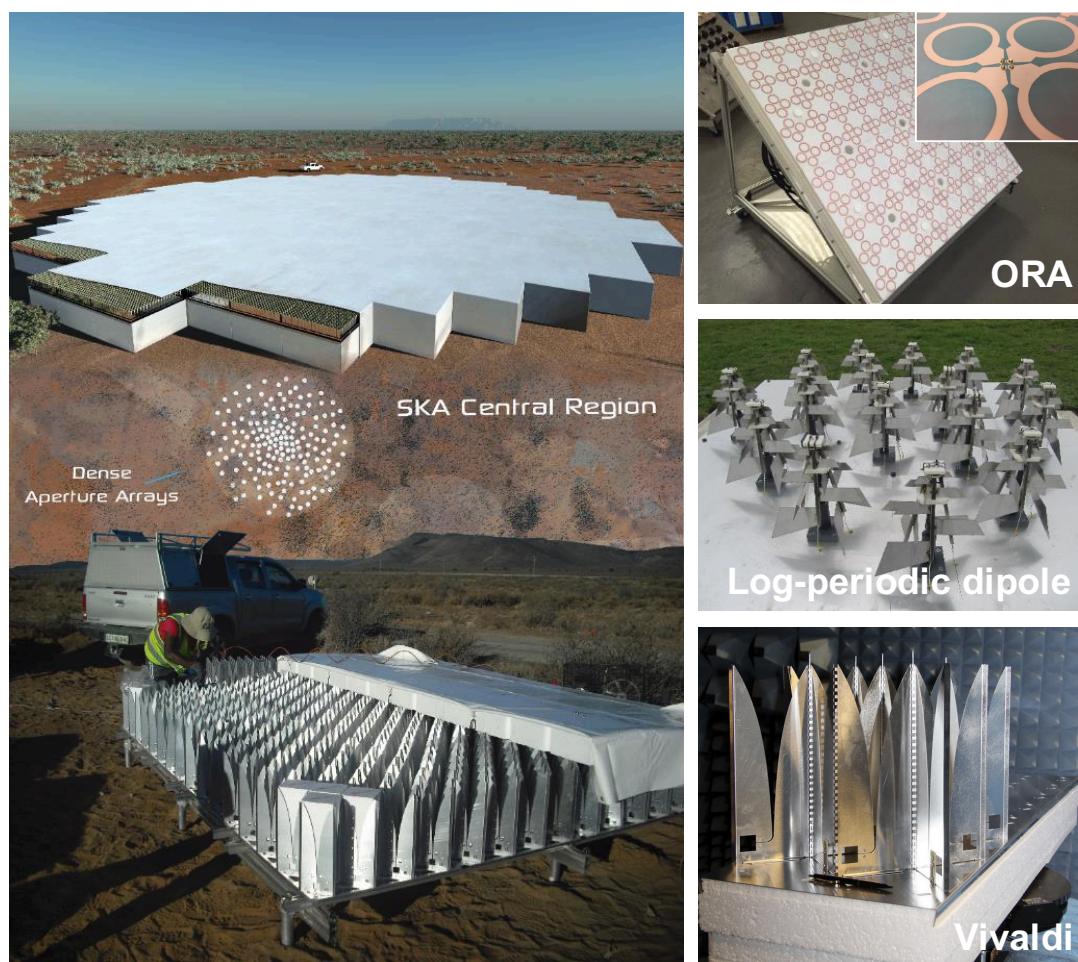


図 5.2.5: MFAA の構想図。1 GHz 帯の素子アンテナを地上に固定したアンテナアレイ。2016 年現在、octagonal ring array (ORA)、対数周期アンテナ、ビバルディアンテナをアンテナの候補として、調査研究している。

れる SKA-MID/LOW の両望遠鏡ともデザインが大幅に異なり、SKA1 の単純な延長線上にはなく、全く新しい電波望遠鏡である。よって SKA2 MFAA (電波望遠鏡の名称としては SKA-AAMID⁴ と呼ばれている) として実現するかは必ずしも明らかではないが、そのコンセプトは次世代望遠鏡として非常に興味深く、SKA 計画の内外によらず恐らく近い将来建設され、強力な電波望遠鏡となるだろう。

MFAA の科学対象は、突発天体⁵、パルサー、宇宙磁場などである。これらは SKA-MID/LOW の科学対象でもあるが、とりわけ突発天体の探査にとって非常に強力な望遠鏡となるだろう。その技術目標は感度とサーベイスピードがそれぞれ

感度: $A_e/T_{\text{sys}} > 10\,000 \text{ m}^2/\text{K}$

サーベイスピード: $\Omega_{\text{FoV}}(A_e/T_{\text{sys}})^2 > 1.4 \times 10^{10} \text{ deg}^2 \text{ m}^4/\text{K}^2$

⁴SKA-AAMID: SKA Aperture Array Mid-frequency

⁵突発天体とは光度が突発的に増加、減衰するような天体を意味し、fast radio burst (FRB) や超新星爆発、重力波源 (ブラックホールや中性子星の合体現象) などさまざまな天体がある。

といったものである。具体的観測性能は [79] で検討されている (表 5.2.1)。

表 5.2.1: MFAA のシステム要求 [79]。

諸元	要求性能	コメント
観測周波数	450-1450MHz	広帯域アンテナエレメントが必要
視野	>200 deg ² @ 1GHz	450MHz で 1000 deg ² , 1450MHz で 100 deg ²
視野数	2	
観測帯域内の感度	>10,000 m ² /K	$T_{sys}=35K$ で $A_{eff}=350000m^2$ に相当
最大基線長	309 km	
画像のダイナミックレンジ	70 dB	

MFAA の利点は、反射鏡を用いた望遠鏡に比べてコストパフォーマンスが良いことである。MFAA コンソーシアムの試算では、上記の技術目標を MFAA で達成するために必要な費用は 10 億ユーロである。同じ額で、SKA2-MID に single pixel feed (SPF) を実装したもの、または PAF を実装したものを作ろうとした場合、SPF では 500 台のアンテナ、PAF では 300 台のアンテナを建設できる。そのときの性能は表 5.2.2 のようになり、同額で建設できる望遠鏡の中では、MFAA の感度とサーベイスピードは突出して良いと見積もられる。MFAA コンソーシアムの言うところでは、反射鏡を用いる SKA1-MID 望遠鏡を単純拡大するよりも、新しく MFAA を建設した方が費用対効果が高く、SKA の掲げる科学を達成しやすい。

表 5.2.2: 10 億ユーロで実現可能な望遠鏡の性能 [80]。

10 億ユーロの望遠鏡	感度 [m ² /K]	サーベイスピード [deg ² m ⁴ /K ²]
MFAA 望遠鏡	10 000 (100%)	1.4×10^{10} (100%)
500 dish SPF 望遠鏡	3 000 (30%)	1.6×10^7 (0.09%)
300 dish PAF 望遠鏡	1 000 (10%)	3.4×10^7 (0.24%)

SKA 機構における MFAA コンソーシアムは、表 5.2.3 に示す通り主に学術機関で構成されている。

図 5.2.5 に示した通り、MFAA のアンテナデザインは ORA、対数周期アンテナ、ビバルディアンテナ (テーパースロットアンテナ) の 3 種類が検討されている。アンテナは地面に固定するため、駆動装置はなくコストがかかりにくい利点がある一方、図 5.2.6 のように観測方向が天頂から離れるほど感度は下がってしまい、観測対象は限られてしまう。また受信系の冷却は行わず、冷凍機や真空装置などはない。常温の低雑音増幅器の性能を図 5.2.7 に示す。

MID アンテナ光学系・給電部・低雑音増幅器

MID アンテナの光学系を全面的に見直すことも考えられるかもしれない。当初の広帯域フィードはビーム幅が広く、またそのビームを狭めることが当時は難しかったため、広いビーム幅を前提に VGOS や SKA の光学系は設計されてきた歴史がある。逆に鹿島 34m の建設時はコルゲートホーンの狭くて良好なビームを前提に f/D の大きなカセグレンが主流であった。ただし鹿島 34m は多数のフィードを焦点面までトロリで持ち上げる構造であるため、保守の弱点を抱え込むことになってしまった。

表 5.2.3: MFAA コンソーシアム参加機関 (2016年10月現在) ^{*a}

Full members	国	担当技術
ASTRON ^{*b}	オランダ	システム設計
KLAASA ^{*c}	中国	受信機、アンテナ
Observatoire de Paris (Nancay)	フランス	フロントエンド MMIC ^{*d}
Stellenbosch University	南アフリカ	アンテナ
University of Bordeaux	フランス	AD 変換器
University of Cambridge	イギリス	システム設計
University of Manchester	イギリス	フロントエンド設計
Associate members		
ENGAGE SKA	ポルトガル	再生可能エネルギー
SKA South Africa	南アフリカ	建設予定地のサポート
University of Malta	マルタ	フラクタル ORA
University of Mauritius	モーリシャス	フロントエンド設計

^{*a} 2016 SKA Engineering Meeting における講演スライド [80] に基づく。

^{*b} ASTRON: Netherlands Institute for Radio Astronomy

^{*c} KLAASA: Key Lab of Aperture Array and Space Application, China Electronics Technology Group Corporation No.38 Research Institute (CETC38)

^{*d} MMIC: モノリシックマイクロ波集積回路

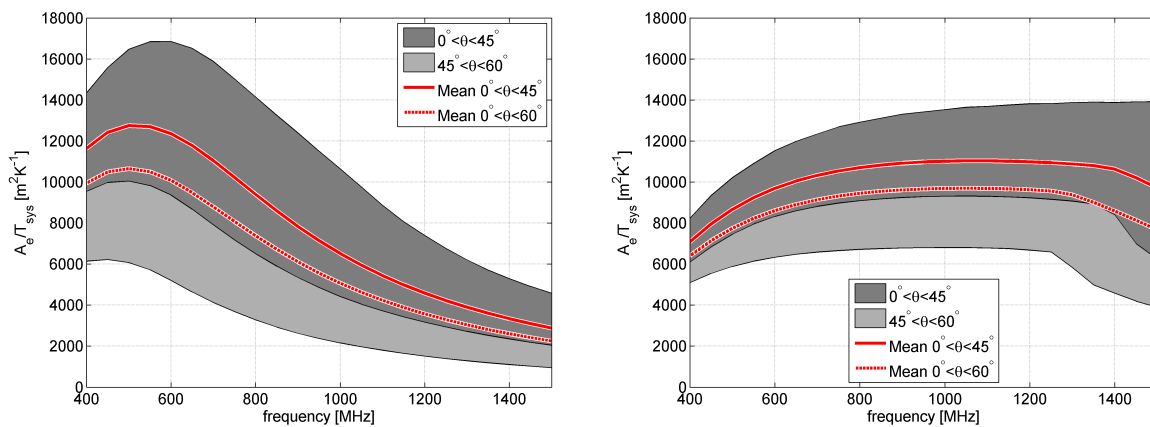


図 5.2.6: MFAA の感度設計 [79]。2つの図はアレイ配列の違いをに対応 (左)random-sparse array、(右) dense apter array system。いずれの場合も天頂からの偏角が $\theta < 45$ deg では良い感度となっている。

そもそも f/D が大きな光学系は収差が少なく良像範囲が広いので、焦点面においたフィードは副鏡でビームを切り替えれば十分である。どのみち大型アンテナは重力変形があり、副鏡の制御機能は省けないゆえに鹿島 34m の複雑は不合理である。他方、ビームの広い広帯域フィードしかなかった SKA では非対称な構造もやむをえなかったが、周波数の異なるフィードは同時使用できないのは不便である。なおかつオフセットグレゴリアンだと受信機を回転させないといけないため、同時観測が設計上難しいだけでなく、余計な時間と駆動部分も要することになる。ビームの狭い広帯域フィードも作れるのであるから、通常のカセグレンで焦点面にフィードを並べる方が

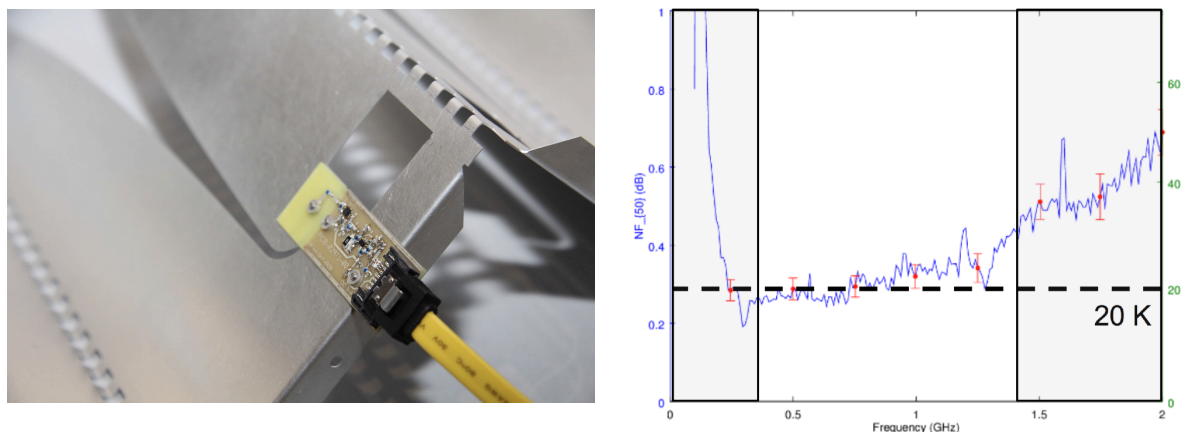


図 5.2.7: ビバルディアンテナに設置された低雑音増幅器を含むフロントエンド部分と、その雑音指数のグラフ。

安くて使い勝手がいいのではなかろうか？視野が少し異なりピンぼけなので若干能率は下がるものの、複数のフィードを同時に使うことができ、広帯域観測が実現できる。フィードを分割することでそれぞれで高い開口効率と低い雑音温度にすることも容易だろう。この方式であれば、例えば水蒸気遅延の補正をしながら同時に好きな周波数の観測ができる。特に台風の多い地域に建設するのであれば、カセグレンのような軸対称なアンテナが安全である。

フィードのデザイン選択は常に光学系の境界条件と所望の周波数範囲で最適なものが選ばれる。コルゲート型やクアドリッジ型が採用される以前には、自己補対型のデザインの検討があった。また最近では誘電体やレンズを使う方式も採用されるようになり、たとえば Parkes の UWL のように 0.7-4.0GHz の広帯域を実現している。これらは計算機シミュレーションが以前よりもより高分解、高精度、あるいは多パラメータでできるようになり、設計自由度が増えてきたという、計算科学の進展にも関係している。その点で、将来はもっと自由度を持った設計でさらに最適化された設計ができるようになると思うのが自然であろう。

LNA については前述の通り、既製品でかなり良好な性能を示す低雑音増幅器が存在している。このメーカーは今後も技術力をもって世界的なシェアを有する可能性はかなりある。全ての要素について技術競争をすることはリソースの限られた中では難しいため、開発の取捨選択は必要になるだろう。その観点では、LNA はどちらかといえば他国・他社製を選択し、日本は日本独自で競争力のある技術項目に注視するべきであるかもしれない。

RFI フィルタリング

300 MHz から 3000MHz(あるいは 350MHz から 3500MHz) の UHF 帯広帯域受信機に対応するためには、RFI の対策は不可欠である。ここで RFI に対する対策には、フィルタによる除去とアダプティブ除去の 2 つの方法がある。フィルタを用いる場合には、低周波側に対応したフィルタの開発が必要になる。一つの周波数フィルタで上記の広帯域全てに対応することは極めて困難であると考えられる。そのため、複数のフィルタを組み合わせる広帯域化することが望まれる。しかしながら、このような広帯域にわたる周波数フィルタの開発例はない。

日本では当該の帯域での単一および 2 バンド、3 バンドの高温超伝導フィルタの開発実績があ

る。例えば東芝では携帯基地局の受信機向けに 900MHz 帯に対応した超伝導フィルター [81]、および地上デジタル放送中継局用に 500MHz 帯に対応した超伝導フィルター [82] を開発してきた。最近では、6バンドの高温超伝導フィルタの開発報告もある（關谷ら日本天文学会 2021 春季年会報告）。これらのマルチバンド技術を活かしながら、広帯域に対応することが、まず SKA での採用には必要である。一方、国内 300MHz、600–700MHz 帯での利用実績がまだないので、より低い周波数帯域での実証も重要であろう。そして究極的な UHF 帯広帯域を実現するためには、これまでの様々な技術を組み合わせて広帯域化が可能か検討する必要があるだろう。広帯域するための新しいフィルタの設計方法の開発に取り組むべきである。

周波数が低くなることに伴ってフィルタ回路は大型化することが避けられない。超伝導フィルタユニットを小サイズ化して初段増幅器前に置くことは、SKA 採用のための差別化技術となる。小型化はノイズの軽減にも有効である。SKA はアンテナ数が多いので、機器設置のコストがかかる。特に高温超伝導フィルタは一般に高価なため、コストダウンは実現に向けた極めて重要な課題である。

RFI キャンセリング

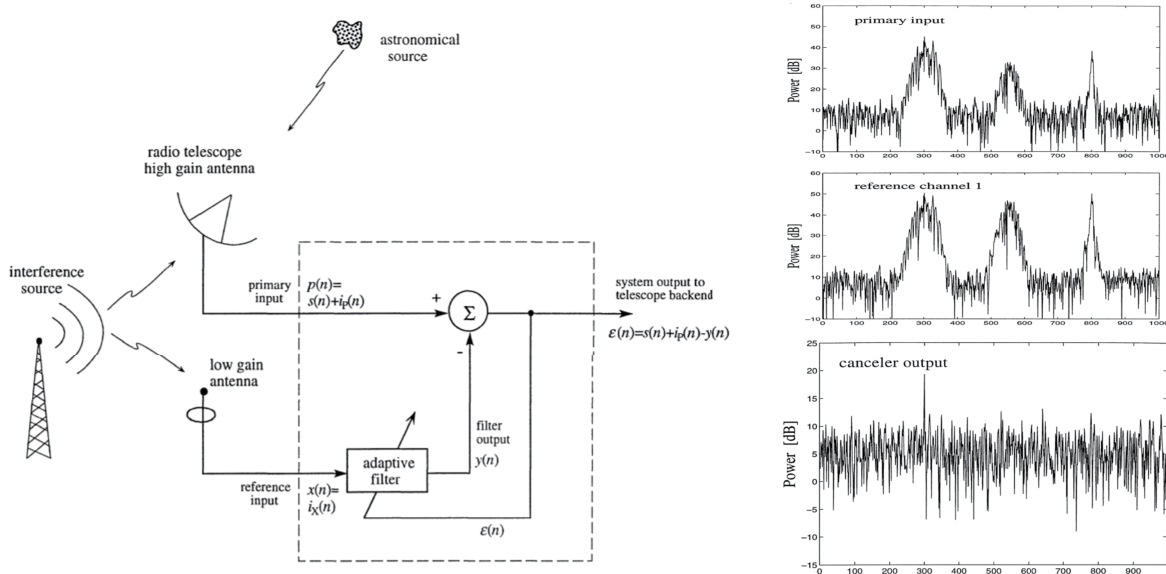


図 5.2.8: (左) アダプティブキャンセリングの概念図。(右) キャンセリングの結果例。

RFI 対策のもう一つの方法・アダプティブ除去は、図 5.2.8 左に示すように RFI 受信専用アンテナで受信した信号を天体観測信号から差し引く方法である。図 5.2.8 左から明らかなように、天体信号に漏れこむ RFI 信号（左上）と RFI 受信アンテナで受信された信号（左下）は全く同じ時刻で同じ振幅に揃えられていなければならない。図 5.2.8 左では、出力される消去結果をアダプティブに制御して差し引きを行っている。しかし、干渉波の大きさや到着時間差は大きく変動し、実時間で完全に除去することは困難である。しかし、除去に成功すれば、干渉波を含む広い周波数帯を天文観測に利用できるため、連続波観測感度を大きく向上することができる。

図 5.2.4 では、帯域制限法（フィルタリング）で RFI を除去した時のパルサーの観測結果（左）と、アダプティブキャンセリングにより RFI 信号を除去した時の同じパルサーの観測結果（右）とを比

較したものである。アダプティブキャンセリングを行っても RFI 信号は若干残留しているが、それでも全帯域が利用可能なので、結果的に SN 比が向上している。

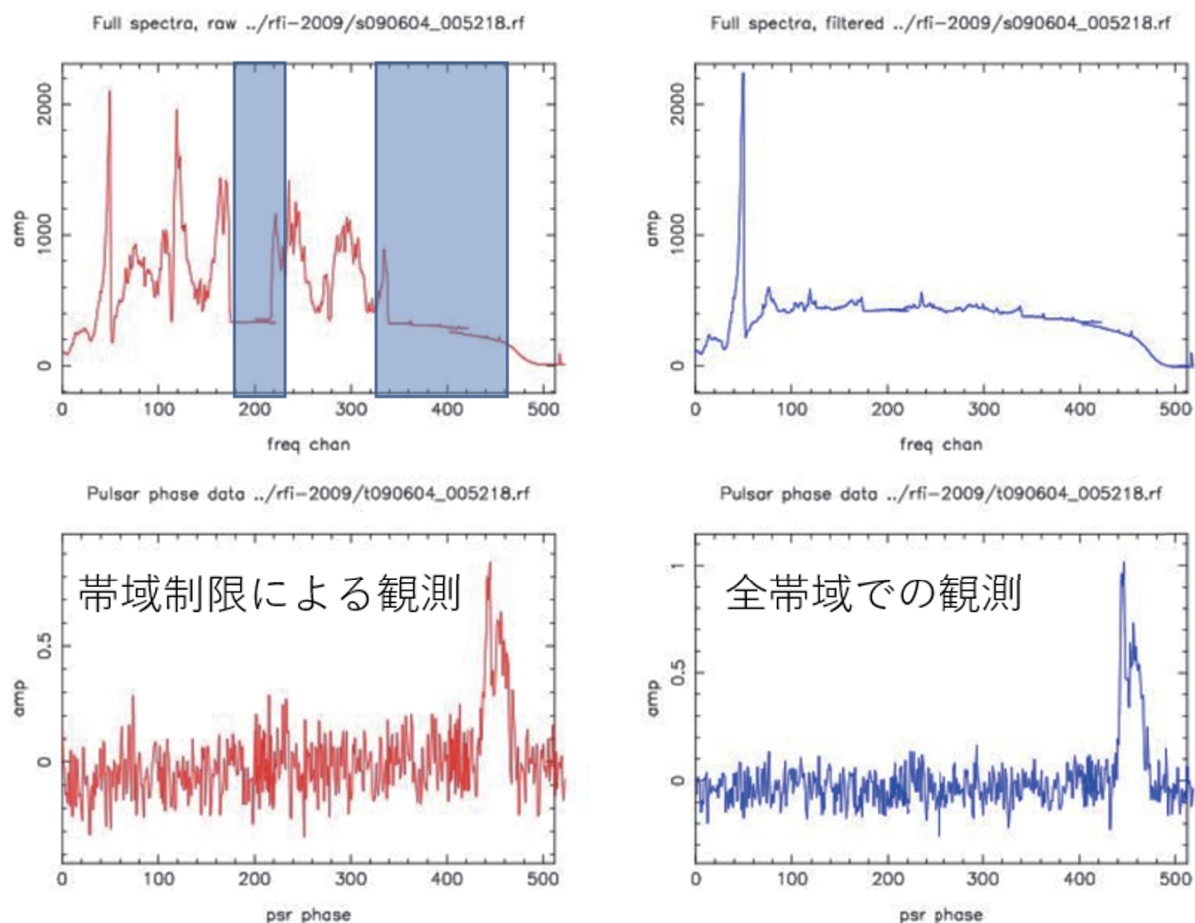


表 5.2.4: 帯域制限法とアダプティブキャンセリング法の違い

国立天文台では熊本大学と協力して高速相関処理技術を導入した新しいアダプティブキャンセリングの研究開発を開始している。この研究では、RFI 源として GNSS 衛星をターゲットにしている。GNSS 衛星は UHF 帯における標準太陽の明るさよりもはるかに強い電波を放射している (5.2.5 上)。GNSS 衛星による電波干渉は、地球上でどんな電波静穏な場所に観測局を置いても避けることができない。しかも、多数の衛星が常時全天を覆っている (5.2.5 下)。また、熊本大学は熊本空港にも近く航法援助無線の影響と除去性能の確認も行える。近くで携帯電話による通信が行われていてもそれらを除去できる可能性がある。

ADC

アナログ・デジタル変換の量子ビット数は、より大きなダイナミックレンジを表現するために多ビット化に向かう流れが世界的にあるが、デメリットとして信号処理のコストが高くなり、そして消費電力も大きくなる問題がある。SKA2 の規模になると、このコスト増は大きな影響となる。

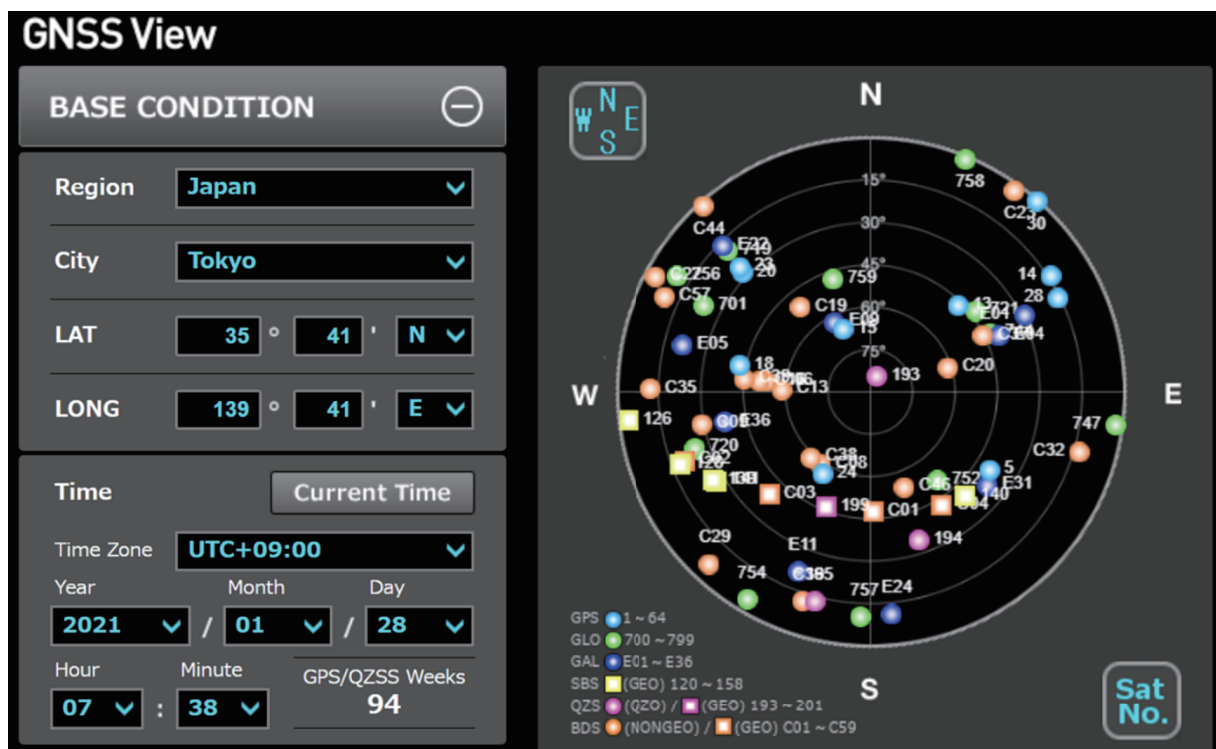
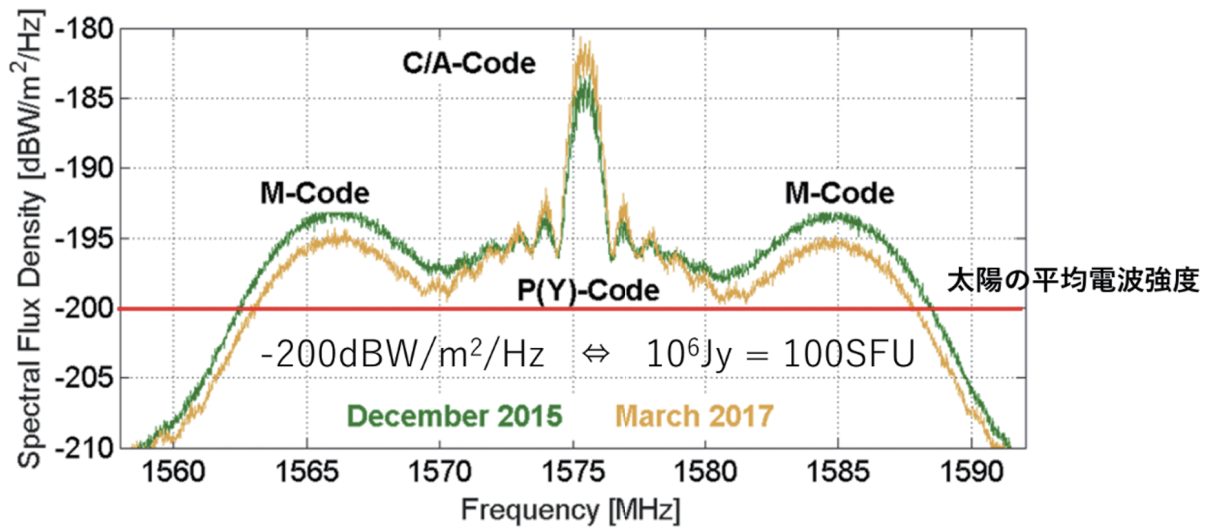


表 5.2.5: (上) GNSS 電波強度と UHF 帯における太陽の平均強度。(下) GNSS 衛星の全天分布。

潮流に逆らう形になるが、あえて1ビットでは本当にだめなのか、様々な試験を行い検証することは十分意義のあることだろう。

1ビットデジタル化の一つのメリットとして、光通信技術を応用できる点がある。光通信は光のオンオフ検出、つまり1ビットで動作しているが、この1ビット光伝送技術は現在急速に進展しており、128 Gsps も実現可能である。これは1ビットのアナログ・デジタル変換に応用可能であり、電波天文で現在主流のマルチビット（2ビットや3ビット、VLBIの場合には記録・伝送制限で2ビット）の場合、帯域幅の上限に制限があるが、128 Gsps は帯域幅が64 GHz を意味しており、ほぼすべてのSKA-MIDのBandをカバーする。広帯域化が進んでいるLNAとも組み合わせ、究極的には現状のSKAバンドプラン（Band 1 から6）の全てを給電できるフィードができれば、1台の受信機で全てカバーできるようになる（ちなみに2bitでも32GHz帯域を取れる）。

1ビットデジタル化の場合、量子化損失は約30%強あるため、そのロスを許容することになる。もしこれにより電力を大幅に減らすことができ、結果としてアンテナ数を増やすなどでむしろ感度を向上させることができるトレードオフが成立するならば、検討の余地はある。その際、アンテナ数が増えると相関処理数も増えるので電力コストは増える。一方、同じチップを使うなら、より多いチャンネルを同時に処理できるメリットが生まれ観測効率が上がる（これは量子化損失と相殺する）。あるいは、より簡素なチップを調達することで信号処理部のコストが下がる。このように、コスト面まで含めると単純ではないが、技術的な検討課題として興味深いだろう。

5.3 日本の経験（開発・準備状況）と計画

最後に、この節では日本のこれまでの開発実績・準備状況を紹介しながら、UHF検討WGとしての、SKA計画への技術開発貢献の計画をまとめる。表5.3.1には、この節で紹介する日本の開発経験および準備状況と、SKAにて貢献したい項目の一覧をまとめた。

表 5.3.1: 開発実績と貢献計画

開発実績	貢献計画
5.3.1 広帯域アンテナの開発	→ 光学系、広帯域アンテナ、OMT
5.3.2 フェーズドアレイ装置の開発	→ バックエンド
5.3.3 広帯域デジタル分光計の開発	→ バックエンド
5.3.4 高感度受信器系の開発	→ SKA-VLBI
5.3.5 広帯域偏波スペクトル系の開発	→ SKA-VLBI
5.3.6 5.3.7 高温超伝導フィルタの開発 (1)(2)	→ 広帯域アンテナ、超伝導工学
5.3.8 国内 UHF 帯域電波環境の調査	→ 広帯域アンテナ、AIV

5.3.1 広帯域アンテナの開発

NICT 鹿島では VLBI による光格子時計の大陸間での精度比較 (Time and Frequency Transfer) 実験に向けて広帯域フィードを開発する必要があった。34m アンテナで集光力を稼ぎ、小型局は 40ft コンテナで輸送可能で時計のそばに設置し、データはネット枠一で転送するシステムである。小型局同士の相関は取れないが大型局を介せば相関がとれるし、大型曲の変形の影響はキャンセル

され、システム全体のコストダウンも図れるのがメリットである。広帯域フィードのビーム幅の34mの17度、小型局の主焦点用の54度、二次焦点用の26度の三種類、構造は34m用の多モードホーン、34m以外にも使える多モードを利用した開口面コルゲートホーンなど様々な広帯域フィードを開発、製作し、観測に用いてきた。

フィードはビーム幅の制御部と、同軸導波管変換部からなる。前者はVSOP-2の経験を踏まえ、喉元で適切な高次モードを励振し、ホーンやレンズでビーム形状を制御する。後者は直交2偏波を出力するOMTであるが、市販のSMA端子をクワッドリッジ導波管に挿入して使っている。同軸部の誘電体を利用して位置を保持し、先端のみ削って空気導波管部を作ってインピーダンスを調整している。芯線は加工精度を管理して、リッジ先端につきあてただけにとどめたことで半田不良などの問題を回避した。

短期間に様々なビーム幅のフィードを製作する必要があったので、34mと小型局のフィードの違いは先端のホーンとレンズのみである。よって、最初から特定の光学系に適合するように設計したフィードに比べれば性能は低いが、50%程度の開口能率は得られている。開発に時間を割けば性能は向上するが、5ヵ年計画のうちに観測結果まで到達せねばならず、カセグレンアンテナ用の広帯域フィードは世界初であったため、性能よりは時間効率を優先した開発となった。

現在、次世代マイクロ波放射計用広帯域フィードの設計と、BRANDのための検討を行なっている。前者は、従来個別のフィードを擁していた水蒸気と水、酸素を1本の広帯域フィードで受信することでシステムの簡素化と低価格化、測定の高精度化を図るものである。この広帯域フィードの帯域は15-60GHzなのでGala-Vの3-15GHzのフィードと連続的に繋がる。これらのフィードを並べれば、低周波側では視野が少し異なるものの大気の補正をしながら3-60GHzの好きな周波数を受信できるアンテナが実現できる。後者のBRANDはヨーロッパの電波望遠高の広帯域化を図る計画で、帯域は1.5-15.5GHzである。ビームの広い1次焦点用フィードの開発は進んでいるが、2次焦点は要求する非常に狭いため、「可能であれば」という条件のもとに解を探索している最中である。

OMTはクワッドリッジ構造で概ね実現できそうであるが、ビームの整形が難しい。鹿島と同じ帯域であれば先端部の交換のみで実現可能なので、当面は鹿島のパーツを流用して使っていたかどうかかもしれない。ただし、必ずしも所望の帯域で性能がいいLNAが買えるとも限らないので、ラジオメータでは16-36GHzは導波管出力、28-56GHzはプリント基板アンテナによる同軸出力としてアンプを分けた構造にせざるを得なかった。どちらのポートも16-56GHzを低損失で出力可能であり、後者を直交させて利用することも可能である。端子までの回路を曲げる必要がないPAFの素子アンテナであれば、さらに広い帯域が得られる。しかしそもそも導波管出力でなければsinous antennaでOMT部を構成してもいいかもしれない。特に周波数が低くなると構造が大きくなるが、プリント基板による平面アンテナなら嵩張らない。これらが実現できればフィード2本で1.5-60GHzの帯域が得られ、UHFまでカバーするならフィード3本の非常にシンプルな広帯域アンテナが実現できる。

以上の開発実績を踏まえて、SKA1-SODPやSKA2でのUHF帯広帯域アンテナの開発を計画したい。

5.3.2 フェーズドアレイ装置の開発

名古屋大学では327MHz帯域において、最大約4000平方メートルの物理開口面積を持つシリンドリカルパラボラアンテナからなる独自の観測装置を開発し、国内3カ所に設置することで、地上

電波観測から太陽風の速度と密度の測定に取り組んできた [83]。これらのアンテナ群は UHF 帯域において国内最大規模の開口面積を有し、主に太陽圏研究で様々な科学成果を創出してきた。また、次世代の太陽圏研究に向けた観測装置の検討を行うとともに、実証実験機の開発を行っている。次世代装置は、より多くの電波天体を観測できるようにアンテナ部はダイポールアンテナによる 2 次元平面フェーズドアレイによる広視野な光学系を検討し、受信機では信号をリアルタイムにデジタル処理することで、複数の方向を同時に指向するデジタルマルチビームフォーミングを採用する。

2020 年度にはデジタルバックエンドのプロトタイプが完成した。本装置に内蔵するために新たに設計されたデジタルボードは、8 つのアナログ入力ポート、8 つのアナログデジタル (AD) 変換、1 つの FPGA、1 つの 10Gbit Ethernet 出力が実装されている。このボードを搭載した本装置の大きさは 37cm x 27cm で、更に小型化も可能なことから、各種観測装置のフロントエンド部分に収納が可能である。また従来品に比べて低価格化も実現された。8 系統の入力信号はデジタル変換部で 12 bit のデジタル信号に変換される。デジタル変換部は数 GHz までの入力信号に応答し、エイリアシングを用いることで動作クロックよりはるかに高周波の入力信号を処理でき、例えば、77Msps の動作クロックを入力することで測定できる 38.5MHz バンド幅は前段に適切なバンドパスフィルタを付加することで、308-346.6MHz などになる。デジタル化された信号は FPGA 内部で 16384 点のフーリエ変換がなされ、8 つの複素スペクトルに任意の異なる遅延フィルタをかけ、加算することでビームフォーミングができる。加算後の複素スペクトルからパワースペクトルを作り、積算し、10ms 毎に出力する。遅延フィルタ以降の処理を 4 種類並列に処理することで、4 つのビームを出力できる。本装置に既知の信号を使って実験した。その結果、適切な遅延フィルタを設定することで、想定した方向にビームを形成できることがわかった。本装置は多数を接続することで、より大規模なアレイを形成することも可能な設計であり、多様な将来計画に応用できる装置であると言える。

次世代フェーズドアレイ装置は UHF 帯域での多チャンネル観測用装置であり、これらのデジタルバックエンド技術は SKA にも応用できる可能性がある。また、UHF 帯域で新規の望遠鏡開発をしている経験を活かして、AIV の経験を積むための開発プロジェクトとしても活用が期待できる。MFAA で検討されているようなフェーズドアレイ装置を日本で開発することは技術的には可能である。当面の課題は、資金とマンパワーと言える。この分野で SKA に採用されるほどの実績は今の日本には無いと言えるので、まずは国内装置の開発を推進し実績を積むところから始めるべきだろう。

5.3.3 広帯域デジタル分光計の開発

UHF 帯域の広帯域観測には、RFI で飽和しないダイナミックレンジを持つデジタルバックエンドが有効である。AD 変換器 (ADC) と Field-Programmable Gate Array (FPGA) を用いたデジタル分光計 OCTAD-S の開発を開発した [84]。本装置は汎用デジタル機器プラットフォーム OCTAD をベースに作られ、デジタル演算で高速フーリエ変換 (FFT) を行うことで分光する。本装置には ADC が搭載されたモジュールと FPGA が搭載されたデジタル演算モジュールがそれぞれメインモジュールと独立して存在し、それぞれのモジュールを交換することで容易に装置の保守や上位デバイスへのアップグレードができる。広いダイナミックレンジを実現するため 10bit の ADC を用いて、2 種類のデジタル分光計を実装した。一方は 4.096 GS/s のサンプリングと 2048 点の周波数チャンネルを持ち (4G4K)、もう一方は 2.048 GS/s のサンプリングと、32768 点の周波数チャンネルを持

つ(2G64K)。両分光計にはデットタイムがなく、FPGA内で積算されたスペクトルが8ms毎に外部の記録媒体に保存される。ADCモジュールにはマイクロ波の周波数まで動作するtrack-and-hold回路を実装した。試験の結果、折り返し雑音(エイリアシング)を用いることで最高10GHzの信号を4GS/sのADCで処理できることがわかった。一方、本装置に用いたADCは4つのコアをインターリーブするため、コア間の位相誤差などによりゴーストが発生した。電波天文分野での影響としては、広帯域観測で強い輝線と弱い輝線を同時に観測する場合、強い輝線によるゴーストによって弱い輝線が影響を受ける恐れがある。そこで12bit-2GS/sで動作するインターリーブしないタイプのADCで4G4Kと同じ分光計を構成し試験をした結果、ゴーストが10dB以上低減することがわかった。強い放送波の多いUHF周波数帯ではインターリーブをしないADCの実装が有効であろう。

広帯域デジタル分光計OCTAD-SはUHF帯域の広帯域偏波スペクトル観測のために作られたデジタルバックエンドであり、現にシビアなRFI環境下でのUHF帯域広帯域観測で威力を発揮している。このデジタルバックエンド技術はSKAにも応用できる可能性がある。また、こちらでもUHF帯域で新規の望遠鏡開発をしている経験を活かして、AIVへの人的貢献も考えられる。当面の課題は、フェーズドアレイ装置と同じく、資金とマンパワーであり、SKAに採用されるほどの実績は今の日本には無いと言えるので、まずは国内装置の開発を推進し実績を積むところから始めるべきである。

5.3.4 高感度受信機系の開発

東北大大学院理学研究科・惑星プラズマ・大気研究センターでは、木星放射線帯電子から放射されるシンクロトロン放射の観測を主目的として、1996年より325MHz帯の電波望遠鏡の開発を開始した。2001年に東北大学飯館観測所(福島県相馬郡飯館村北緯37度42分、東経140度41分)に飯館惑星電波望遠鏡(Iitate Planetary Radio Telescope: IPRT)が設置され、現在に至っている。

高感度受信系のフィードとして、長方形のパラボラ面に対して照射パターンを調整したビーム成形素子付きフィードを開発し、開口能率65%を達成している[85]。325MHz帯と785MHz帯の低雑音受信機が搭載され、帯域幅は20MHz程度、システム雑音温度(典型値)はそれぞれ150K、100K、最小検出感度は0.1-1Jyである(785MHz帯受信機は650MHz帯への換装を予定している)。

高感度受信系の出力は、東北大学が開発した放射計に加え、情報通信研究機構・鹿島VLBIグループが開発したVLBI観測用高機能波形サンプラK5/VSSP32により記録されている。放射計は、主に木星シンクロトロン放射の絶対強度観測に用いられてきた[86][87]。

波形サンプラは、狭帯域の干渉波を除去した測光観測に加え、パルサー観測[88]や名古屋大学宇宙地球環境研究所のIPS観測用電波望遠鏡とのVLBI実験(327MHz帯)に使用している[89]。現在、325MHz及び650MHzの2周波数帯で帯域を拡張した受信系の開発に取り組んでいる。

SKA時代には、他局の低周波電波望遠鏡とのVLBI観測による、コンパクト天体、突発天体の観測を推進していきたいと考えており。この際に2周波共用の広帯域給電器の開発が不可欠なのでその開発を進めたい。

以上の開発実績を踏まえて、SKA1-SODPおよびSKA2において進められるSKA-VLBI全般の技術開発を計画したい。人的な貢献や、VLBI試験での技術プラットフォームとして貢献することができるだろう。

5.3.5 広帯域偏波スペクトル系の開発

AMATERAS(the Assembly of Metric-band Aperture TELEscope and Real-time Analysis System) は IPRT に搭載された太陽電波観測用偏波スペクトル計である [90]。AMATERAS としての開口能率は 6-36%、最小検出感度は 0.05-0.7 SFU(Solar Flux Unit) で、主要な観測対象は、150-500 MHz の太陽電波バーストである [91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98]。IPRT で受信されたアナログ帯域幅 500MHz の右旋および左遷偏波信号のうち、右旋偏波を 500MHz-1GHz の帯域にアップコンバートしたのち、帯域幅 1GHz のデジタル分光器 (Aquiris A240, 2Gsps, 8bit) に入力することによって、RCP と LCP 両偏波成分の同時観測を実現している。デジタル分光器内の FPGA では 1GHz 帯域幅の波形がリアルタイムで FFT 処理され、時間分解能 10ms、周波数分解能 61kHz、ダイナミックレンジ 16bit のスペクトルが出力される。観測データと Quick Look はデータベース化され [99]、東北大学の Web ページ (<http://radio.gp.tohoku.ac.jp>) から公開されている。

現在、広帯域フィードの開発に取り組んでおり、広帯域に渡る高感度化を目指している。高感度化された受信系を用い、150MHz 帯、235MHz 帯における他局の高感度電波望遠鏡との VLBI 観測への寄与していくことを考えている。

以上の開発実績を踏まえて、SKA1-SODP および SKA2 において進められる SKA-VLBI 全般の技術開発を計画したい。人的な貢献や、VLBI 試験での技術プラットフォームとして貢献することができるだろう。

5.3.6 高温超伝導フィルタの開発 (1)

近年、山梨大学では超伝導帯域通過フィルタを電波天文分野に応用する研究を進めている。超伝導体の表面抵抗は銅などと比較して、マイクロ波帯で 2 桁～3 桁程度低い。そのため超伝導体を使ったフィルタは従来技術では実現できない。低損失と急峻な遮断特性を両立することができる。その特徴を活かすことで、不要な外来波を除去し、宇宙からの微弱な電波だけをとりだすことができる。

JAXA では深宇宙探査機との通信設備である白田 64 m 口径パラボアンテナの老朽化に伴い、口径 54 m の新型アンテナの開発を行っている。新型アンテナの受信機は周囲からの不要な電波が問題となっていた。その電波を取り除くためには、小型かつ低損失で急峻な遮断特性を持つフィルタが必要であった。そこで、山梨大学ではこれまで培った超伝導フィルタ研究の成果を活かして、この問題を解決する超伝導フィルタを開発した [100]。その結果、JAXA 深宇宙探査用地上局に採用されることになった。2019 年 12 月には「はやぶさ 2」との交信に成功し、2021 年 4 月からの本格運用に向けて着々と準備が進んでいる。

名古屋大学では、広帯域に渡り複数の大気分子スペクトルの同時観測が可能なミリ波分光観測装置の開発を進めている。しかし、そのような分光観測装置は中間周波数増幅 (IF) 系が複雑化する問題があった。従来の装置構成ではダウンコンバートする分子スペクトルの周波数によって経路を分岐しなければならず、分波器と結合器の他に帯域ごとに帯域通過フィルタ、アッテネータ、ミキサを使用するため、雑音の増加や、周波数特性の悪化が懸念されていた。そこで山梨大学では 2 つの通過帯域を持ち低損失と急峻な遮断特性の両立が可能である超伝導デュアルバンド帯域通過フィルタを開発することで、非常に簡易な装置の実現に貢献した [101]。開発した超伝導デュアルバンド帯域通過フィルタの周波数特性を図 5.3.1 に示す。シミュレーション結果と測定結果が非常によく一致し、必要な大気分子を確実に通過させることができるフィルタを開発した。本装置は現在南極昭和基地に設置し、測定の準備を進められている。

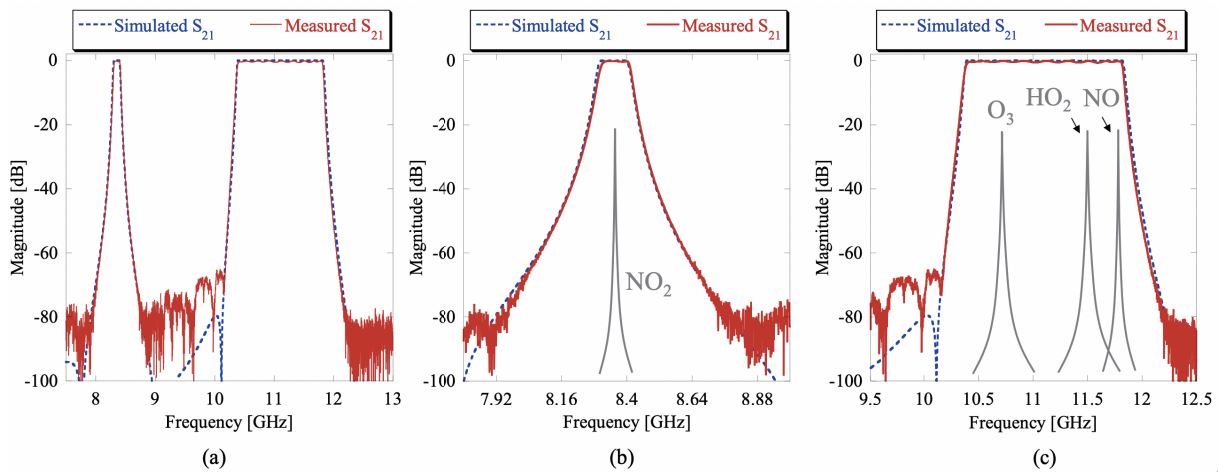


図 5.3.1: 開発した超伝導 DB-BPF の周波数特性. (a) 広帯域特性, (b) 低周波 BPF の拡大, (c) 高周波 BPF の拡大.

以上の開発実績を踏まえて、SKA1-SODP や SKA2 での超伝導フィルタの技術開発を計画したい。スマートフォンやタブレットなどの移動体通信の更なる発展に伴い、不要な電波の除去は今後より重要となると考えられる。また、フィルタの低損失化は受信機の感度向上にも重要だと考える。そのため、受信機のフロントエンドには超伝導フィルタは不可欠だと考えられる。当面の課題は、複数の帯域通過フィルタの開発にある。UHF 帯には主にスマートフォンなどの移動体通信に使用する帯域が複数あるため、空いている帯域を束ねて使用しなければならない。そのため複数の帯域通過フィルタが必要となるが、単純に帯域通過フィルタを接続しても良好な特性を得ることができない。山梨大学ではこれまで、図 5.3.1 に示す二つの帯域通過フィルタを持つフィルタの研究をはじめとし、複数の帯域通過フィルタをもつマルチバンド帯域通過フィルタ [102] の研究を行ってきた。それらの経験を活かし、SKA での UHF 広帯域受信機の開発に貢献したいと考えている。

5.3.7 高温超伝導フィルタの開発 (2)

我々はこれまで本高温超伝導フィルタを気象レーダ向け [103]、および電波天文の観測における干渉波抑圧フィルタを開発し、効果的に機能することを確認してきた。[104]。電波天文の観測では天体からの非常に微弱な電波を観測する必要があるため、高性能なアンテナと高感度受信機を用いたシステムを用いる。しかし高感度受信機の受信周波数帯に観測する天体以外からの不要な干渉波が入ってきてしまうと、低雑音増幅器 (LNA) が飽和してしまい観測ができなくなる問題がある。近年、国立天文台水沢 VLBI 観測所および石垣島観測局とタイ国立天文学研究所 (NARIT) の電波望遠鏡に設置するための高温超伝導フィルタを搭載した小型受信機を開発した。[105, 106] 今回設計したフィルタは 1.4GHz から 2.2GHz の周波数帯のうち 4 つの天文保護バンド等を通させる構成となっており、特に衛星携帯電話のイリジウムバンドを減衰させるため 1.6GHz 帯に急峻な帯域阻止フィルタを組み込む仕様となっている。フィルタ単体の設計仕様は、通過帯域での挿入損失は 0.2dB 以下、干渉波が入る周波数での減衰量は 30dB 以上を目標とした。

今回設計したフィルタは、帯域阻止フィルタと 3 帯域通過フィルタとで構成される。帯域阻止フィルタは共振器を伝送路と結合することで、その共振周波数である信号だけを反射させること

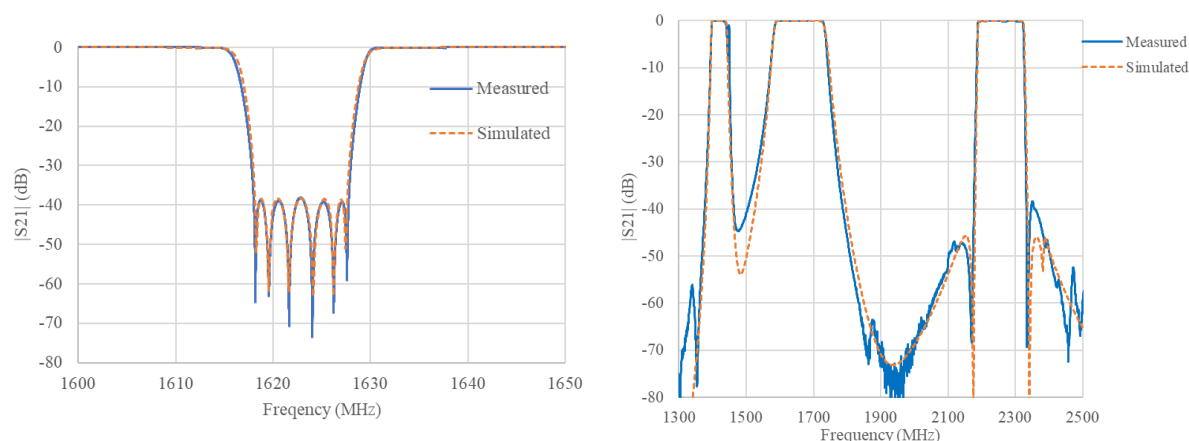


図 5.3.2: 各フィルタの-196 °Cにおける測定結果。(左図) 帯域阻止フィルタの通過特性および、(右図) 3 帯域通過フィルタの通過特性

で特定の周波数だけを反射する特性が実現できる。3 帯域通過フィルタは 1.4 GHz 帯、1.6 GHz 帯、2.2 GHz 帯の三つの帯域通過フィルタである。三つの異なる帯域を持つ帯域通過フィルタを広帯域に整合させる整合素子で並列合成して 3 帯域を実現している。

図 5.3.2 に帯域阻止フィルタと 3 帯域通過フィルタの通過特性の測定結果を示す。帯域阻止フィルタは挿入損失が 0.1 dB 以下で、阻止域の減衰量が 38 dB 以上である。イリジウムバンドに隣接する観測周波数帯の信号を低損失で通過させ、イリジウムバンドの不要干渉波だけを急峻に減衰させるフィルタ特性を実現した。3 帯域通過フィルタは、観測に必要な 3 帯域の信号を挿入損失 0.1 dB 以下の低損失で通過させ、1.4 GHz 帯、1.6 GHz 帯、2.2 GHz 帯の三つの帯域の干渉波を 40 dB 以上減衰させるフィルタ特性を実現した。これにより、挿入損失と減衰量のいずれも目標とする仕様を満たす特性であることを確認した。

図 5.3.3 に NARIT の 4.5m 電波望遠鏡に搭載された高温超伝導受信機を示す。冷凍機にはスターリング冷凍機を用いており、最大負荷時における消費電力は約 100 W である。2 つの超伝導フィルタと冷却 LNA は真空容器内に収められ外部から真空断熱されており、各回路を-196 °C に冷却して長期間動作可能な構成となっている。図 5.3.4 にこの受信機の特性を示す。この結果、各干渉波の信号を 40dB 以上低減し、観測に必要な 4 つの帯域のみを受信するマルチバンド特性を実現した。また、受信機の感度を示す雑音指数は 0.4dB(雑音温度=28K) 程度と非常に低雑音・高感度な受信機特性を実現した。この受信機は、外形寸法 150 × 470 × 125 mm、質量 15 kg、容量 8.8L となり小型な形状で冷却受信機を実現している。この受信機は小型・軽量であるため、電波望遠鏡のフィードアンテナ一次焦点部に直接取り付けることができ、従来では難しかった小型電波望遠鏡の高感度化が可能となる。

以上の開発実績を踏まえて、SKA1-SODP や SKA2 での超伝導フィルタの技術開発を計画したい。受信機の前段部分に本フィルタを搭載することで、干渉波の信号を除去して電波天文学の観測に必要な周波数帯だけを受信することができる。さらにフィルタ通過後の信号を液体窒素温度まで冷却した低雑音増幅器 (LNA) に入力することで、熱雑音をできるだけ小さくした状態で信号を増幅できるソリューションを提供する。今回開発した高温超伝導フィルタは冷却温度が液体窒素温度だが、更に低い温度環境でも超伝導状態を維持するため同様に使用可能である。また既存の受信機に対しても、液体窒素温度以下に冷却される設置空間が確保できれば、本フィルタ回

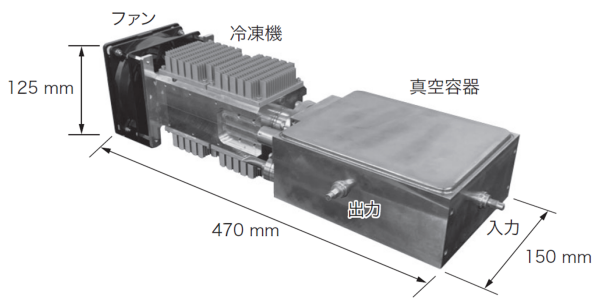


図 5.3.3: NARIT の 4.5m 電波望遠鏡に搭載された高温超伝導受信機 [107]

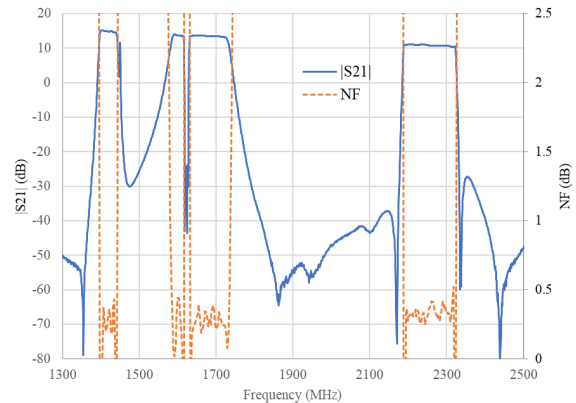


図 5.3.4: 高温超伝導受信機の特徴

路部のみをモジュール化することで導入可能である。

当面の課題は、まず固有の電波環境に最適なフィルタ設計を行うために、事前の電波利用状況の事前調査が重要である。その上で減衰量の要求を満たしながら、フィルタ増設による損失増加やコネクタなどの損失を許容内に抑える設計が必要となる。また既に設計されている受信機内の冷却部に設置できるような寸法に抑えるパッケージ設計が必要となる。

5.3.8 国内 UHF 帯電波環境の調査

日本の SKA コミュニティが掲げる 3 つのキーサイエンスの一つ「宇宙磁場」の科学目標の一つが、宇宙大規模構造にあると理論予測される銀河間磁場を発見することである [27]。この発見は宇宙の構造形成史、プラズマ物理、そして宇宙論に大きなインパクトを与える。この発見の切り札として、日本は「ファラデーモグラフィ」というファラデー回転を引き起こす磁場や磁気流体物質の視線分布を得ることができる画期的手法に注力している (3 章を参照)。その手法には直線偏波のデータが不可欠で、精度良い研究には長波長域で広帯域な偏波観測が必要である。

そこで我々は長波長域で広帯域な偏波観測を実現するため、300MHz から 3GHz に渡る ultra high frequency (UHF) 帯全域を網羅する究極の受信機を SKA に搭載することを最終目標に、まず広帯域フィードの開発を提案しそれに向けた調査研究を始めている。この調査の準備として、我々は日本の UHF 帯電波環境の調査を進めてきた。この調査の目的は、将来 UHF 全帯域フィードを用いた日本国内での観測で、アンプを飽和させてしまうような極めて強い電波障害 (radio frequency interference; RFI) となりうる周波数帯を明らかにすることである。この目的に沿って、低ゲイン・無指向性 (全方位性) のアンテナを使って、日本国内の電波望遠鏡施設における電波環境の調査を行っている。

図 5.3.5 には、2017 年の鹿島局、および 2020 年の臼田局での観測装置の設置の様子を示す。一連の調査は、ディスコーンアンテナと涙滴アンテナを使用し、地表面全方位の垂直偏波のみを測定した。増幅器を経た信号をスペクトルアナライザ (以後スペアナ) に入力し、電波スペクトルを取得した⁶。ディスコーンアンテナで低周波部 (100—1000 MHz)、涙滴アンテナではスペアナの性能上、周波数を中周波部 (1000—2000 MHz) と高周波部 (2000—3000 MHz) に分けて 2 回観測し

⁶鹿島局での計測時のみ、増幅器の後ろにダウンコンバータとアッテネーターを追加している。



図 5.3.5: (左) 鹿島局での計測の様子。(右) 白田局での計測の様子。

ている。スペアナの設定はRBW 1MHz、VBW 1kHz または 1MHz であり、Trace モードを Normal と MaxHold とし、瞬時スペクトルと約 5 分間での最大値保持スペクトルを取得した。受信機の帯域特性を除去するために、アンテナ部を終端抵抗に付け替えて、簡便な受信機帯域特性データも取得した。ただしアンテナの正確な周波数特性や指向性は不明であり、測定系全体の周波数特性も測定していないため、絶対的な受信強度を知ることはできない。本調査の目的は、天文観測の際に明らかに電波障害となる周波数帯を明らかにし、遮断すべき周波数帯を特定することであるから、電波強度には興味がなく上記の設定で問題はない。

図 5.3.6 に測定結果をまとめる。鹿島局は 2017 年 8 月 28 日に鹿島 34m アンテナ観測局舎屋上で行った。当日の天候は曇り。調査は昼と夜に行った。水沢局は 2018 年 8 月 23 日に水沢局内で行った。当日の天候は晴れのち曇り。電波環境の時間変動性を考慮し、測定は朝 (6 時 — 8 時 JST)、昼 (13 時 — 15 時 JST)、夜 (22 時 — 24 時 JST) の三回実施した。白田局は 2020 年 2 月 12 日から 14 日にかけて白田局内で行った。当日の天候は晴れ時々曇り。電波環境の時間変動性を考慮し、測定は早朝 (6 時 — 8 時 JST)、朝 (9 時 — 11 時 JST)、昼 (12 時 — 14 時 JST)、昼 (15 時 — 17 時 JST)、夕方 (18 時 — 20 時 JST)、深夜 (23 時 — 25 時 JST) の 6 回実施した。豊川局は 2020 年 11 月 9 日に豊川局内で行った。当日の天気は晴れ、調査は昼 (12 時 - 17 時 JST) に行った。

図示したスペクトルは、得られた生データに対して増幅器の帯域特性を除去するオフセット調整を施している。使用したディスコーンアンテナと涙滴アンテナはともに垂直偏波を受信し、トーラス型の感度パターンをもつため、図は全方位から到来する垂直偏波の強度を示したものであり、上空からの電波や水平偏波の影響は小さいことに注意する。例えばテレビ放送の送信所のほとんどは水平偏波を放射しており、今回の測定装置では受信しにくいためその強度は本来より小さく測定されることに留意する。また全方位指向性のため、ある電波がどの方角から到来したのかはわからない。またここでは示していないが、この電波スペクトルは時間変動しうるものであり常にこの環境を保っているわけではない。

瞬時スペクトルと最大値保持スペクトルの違いから、定常的には電波が発射されていなくとも、突発的に電波が発射されている周波数帯があるとわかる。このように突発的に発射された大強度の電波も、増幅器を飽和させ突発的な利得減少を招くため、電波天文には利用できない。よって図示したスペクトルのうち、特に最大値保持スペクトルに注視する必要がある。各周波数帯がどの産業界で使用されているかは興味の対象ではあるが、電波周波数割当は複雑で細かく、またこのレポートの目的外であるため言及を避ける。日本における周波数割当状況は総務省の周波数割当表を参照されたい。周波数 1 GHz 以下の帯域では日中の電波利用がことさらに活発であり、昼

の間は天文観測にはほとんど使えないかもしれない。しかし720 MHz付近のRFIは青色の瞬時スペクトルが示すように、常時存在しているわけではない。1 GHz以下の帯域では瞬時的な大強度電波を発射する利用形態が多いものと推察される。周波数1 GHz以上の帯域では、一部の周波数帯を除いて電波環境の時間依存性は大きくないことがわかった。なお白田局では放射禁止帯域の1400 MHzにRFIが認められる。これはビジター滞在場所のBSチューナーが原因ではないかと考えられている。

以上の活動を踏まえて、SKA1-SODPやSKA2での技術貢献に向けた長期的な若手技術者の育成を計画したい。50年は運用するSKAにおいて、若手の継続的な育成は極めて重要な課題である。初めから望遠鏡に精通し即戦力となれる学生、初めから技術開発に強い動機をもつ学生は必ずしも多くない。そこでこの章の根的な国内RFI計測の活動を、SKA1-SODPやSKA2での技術貢献に向けた「入り口」とし、具体的な育成プログラムの一環にしていきたい。RFIの観測という、まずは簡単で、しかし面白みのあるところからはじめ、電波観測に慣れて頂きつつ、マイクロ波工学の基礎を理解することで、電波観測技術者の感覚を養っていく。

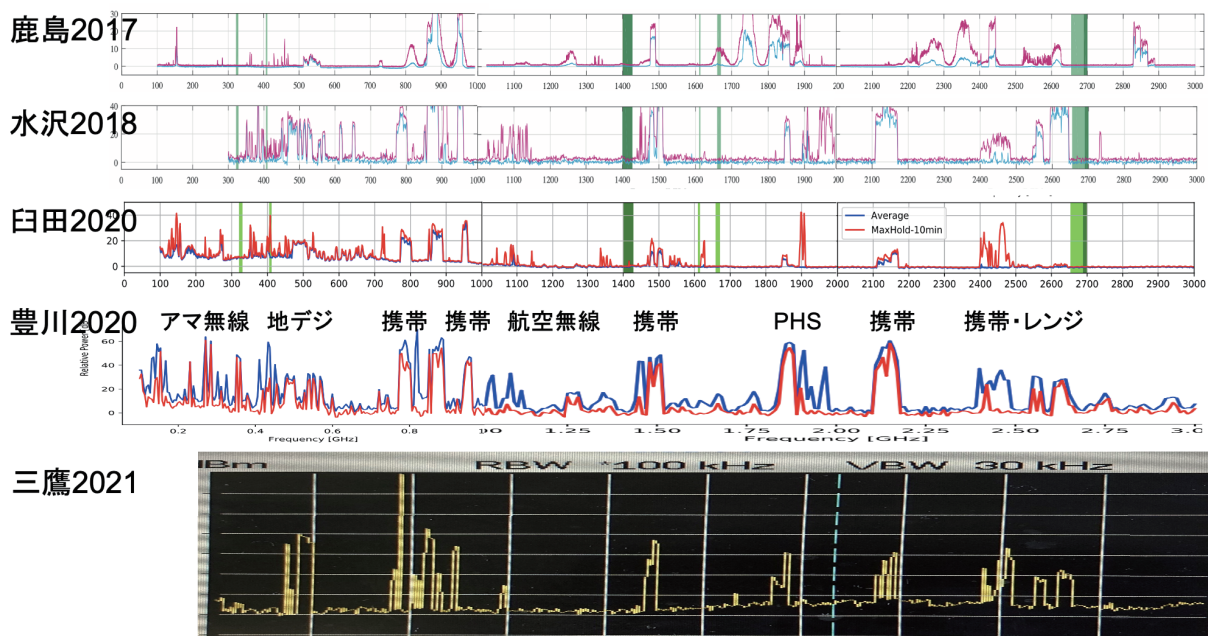


図 5.3.6: 上から鹿島局 2017 年 8 月 24 時 JST、水沢局 2018 年 8 月 23 時 JST、白田局 2020 年 2 月 13 日 23 時 JST、そして豊川局 13 時 JST である。上段 3 つでは青線が瞬時スペクトル、橙線が約 5 分間の最大値保持スペクトル。豊川局は逆で、橙線が瞬時スペクトル、青線が約 5 分間の最大値保持スペクトルである。参考までに新しく調達した UHF 帯ディスコーンアンテナで計測した国立天文台三鷹キャンパスでの電波環境も示す。基本的に強い RFI は同じ周波数でどの局でも見られ、これらは携帯電話である。

著者一覧（○は編集責任者）

○赤堀卓也	国立天文台
岩井一正	名古屋大学
氏原秀樹	京都大学
川口則幸	国立天文台
關谷尚人	山梨大学
高橋健	(株)東芝ホクト電子
土屋史紀	東北大学
新沼浩太郎	山口大学
長谷川豊	大阪府立大学
三澤浩昭	東北大学

第6章 Band-6/Band-7 受信機開発検討

執筆: 国立天文台 河野裕介

6.1 Band 6 受信機

6.1.1 SKA 観測バンドの周波数

SKA/MID のアンテナには、周波数ごとに分かれた複数の受信機が搭載される。SKA1 において搭載が決定しているバンドを表 6.1.1 に示す。複数の受信機は、インデクサと言われるアンテナの焦点部に置かれたインデクサにされる (図 6.1.1)。このインデクサが回転することでアンテナで集光された電波をどのバンドの受信機で受信するかを選択することができる。Band 3, 4 5a と 5b は 1 つのクライオスタットに搭載される (Band 345 クライオスタットと言われる)。

Band6¹ は、この SKA のベースラインデザインにはないが、周波数を高周波に拡張する計画中のバンドである。周波数は未定であるが、15-26 GHz が想定されている。

表 6.1.1: SKA1-MID の受信バンドと Band6 受信バンド (予想)

バンド名	周波数範囲 (GHz)	SKA1 での搭載
Band 1	0.35 - 1.05	搭載
Band 2	0.95 - 1.76	搭載
Band 3	1.65 - 3.5	非搭載
Band 4	2.80 - 5.18	非搭載
Band 5a	4.6 - 8.5	搭載
Band 5b	8.3 - 15.4	搭載
Band 6	(15 - 26)	非搭載

6.1.2 Band 345 クライオスタット

Band6 受信機は Band 345 クライオスタットに搭載されることが想定されている。Band 345 クライオスタットの外観を図 6.1.2 に示す。Band 345 クライオスタットは中央に冷凍機のコールドヘッドが置かれる。コールドヘッドは 2 段になっており、それぞれ 70K, 20K の 2 つの温度ステージを冷却する。それぞれのステージは熱伝導帯を通じて複数のバンドの低雑音増幅器やの冷却を

¹Band 6 は Band5c と記述されることがある。本レポートでは ASPFR で用いられる名称である Band 6 を用いることとする。

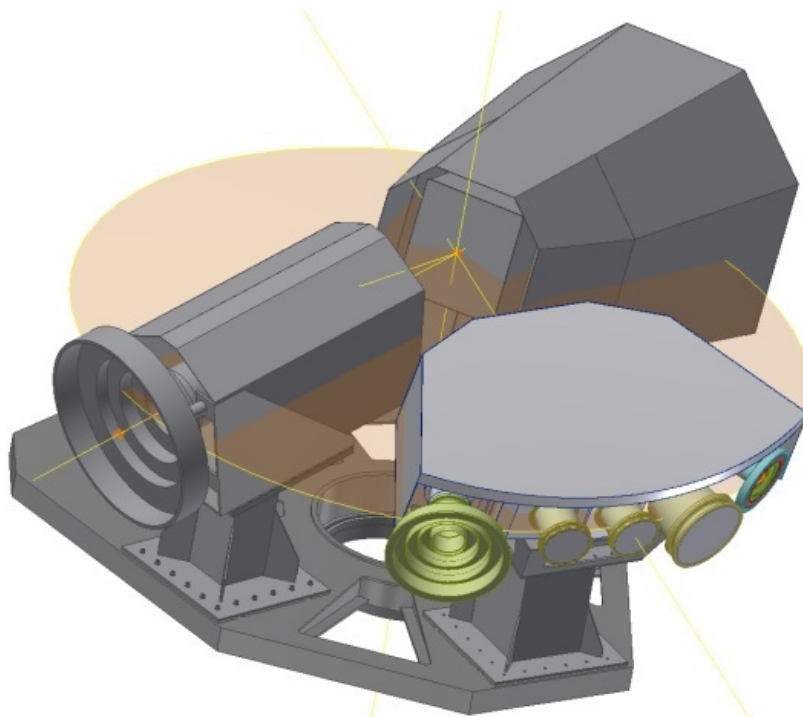


図 6.1.1: DISH インデクサ外観図 [108]

行う。外部の 300K ステージとは断熱構造体や MLI (Multi Layer Insulation) 等を用いて断熱されている。

Band6 受信機が搭載される場合、その給電ホーンは、Band 3/4/5a/5b の給電ホーンの間 Access Flange と呼ばれる場所に搭載されることがあらかじめ想定されてクライオスタットが設計されている。そして Band6 が搭載されるまではフランジ部が金属の板で閉じられる。

6.1.3 Band 6 受信機システム

Band 6 受信機の仕様

2021 年現在、Band6 受信機は SKA 1 のスコープ外であるため仕様が定められていない。参考として最も周波数が近い Band 5b について以下に述べる。

Band 5b の感度は Precision と Standard の環境条件²において 805 m²/K 以上とされている。ここで MeerKAT のアンテナは除き、アンテナの仰角は 30 deg 以上である。アンテナは合計 133 台のため、1 台のアンテナあたりに換算すると 6.05 m²/K となる。開口能率の性能についても別途定められており、8 GHz から 15GHz の間では 70%とされている。そこで口径 15m のアンテナの開口能率 70%の開口面積を用いて、システム雑音温度の条件を計算するとシステム雑音温度は 20 K 以下が求められることになる。

²Precision と Standard の環境条件は次のとおりである。温度条件は、最高温度 40°、最低温度 -5°、最大温度変化 3 °/1000 秒以内とする。また降雨、着氷、降雪、降霜、地震、落雷がないとする。

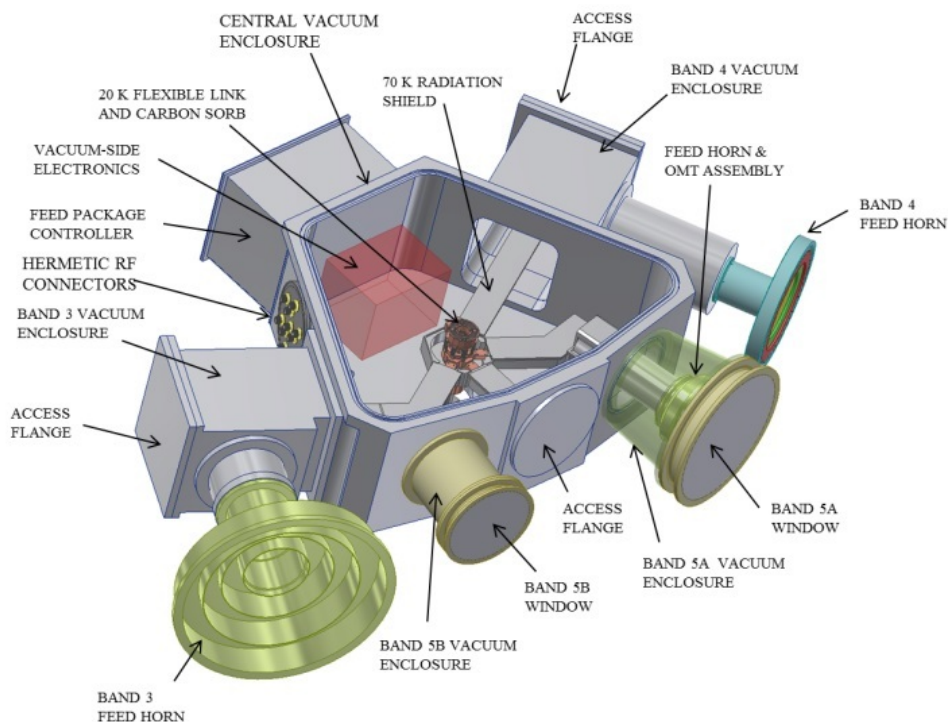


図 6.1.2: DISH Band 345 クライオスタット外観図 [108]

受信機システム概要

Band6 の給電部の SKA による設計は行われていない。ただ Band 3, 4, 5a, 5b, 6 とともに最高周波数と最低周波数の比率が 1.8 前後であるため、同等の技術が使われることが予想される。フィード部は Axially Corrugated horn が Band 5b 以下では採用されている。また Band 5a, 5b ではホーン全体がクライオスタット内部の 70K ステージに連結されたエリアに搭載され断熱電波透過窓を通じてアンテナに給電されている。これによりフィード部の損失による雑音温度上昇を低減することができる。フィードで円形導波管に変換された電波は OMT により偏波分離され、2つの同軸回路に出力される。20K ステージに設置された 2 偏波に相当する 2つの低雑音受信機は同軸回路で入力された信号を増幅し同軸回路でそれぞれ出力する。それらの出力信号は 300K ステージに搭載された後段の増幅器やフィルタなどのデバイスを経由してクライオスタットの外部に出力される。

また受信機部においてのノイズダイオードなどをを使ったノイズ信号を注入する必要がある。それらはアンテナ間で独立に ON/OFF 制御され注入される。ノイズの注入レベルはシステム雑音温度の 5 から 15% 増加することが MID の仕様書に記述されている。Band 5b などほかのバンドではノイズソースはクライオスタットの中の 300K ステージに置かれた温度制御されたエリアにノイズソースが設置されホーン部から注入される。

クライオスタットから出力されたそれぞれのバンドの信号は、インデクサに置かれた SPFR_x (Single Pixel Feed and Receiver) と言われるデジタイザユニットに伝送される。ここでバンドスイッチや、増幅、イコライザなどの処理がなされて AD 変換される。また SPFR_x はクライオスタットの内部のノイズソースの ON/OFF の制御機能も担う。AD 変換された信号は光ファイバを通じてインデクサからアンテナ支柱内部の Dish Pedestal Shielded Compartment に送られ、そこでデジタル

フィルタやパケタイザなどの信号処理が行われ、100GbE の信号となり、CSP へ伝送される。

6.1.4 開発計画

6.1.5 SODP[109]

SKA 観測所は SKA1 のスコープ外の観測機能の開発を SODP (SKA Observatory Development Program) というプログラムを用いて検討と開発を進めることになっている。SODP は 2021 年に発足する予定である。

本レポート執筆時現在の SODP の計画のスケジュールを図 6.1.3 に示す。SODP が開始されるとまずサイエンスロードマップとエンジニアリングロードマップが同時に検討される。その後ロードマップに適合した開発計画が展開される予定になっている (6.1.3)。ロードマップの検討の後に研究フェイズが設けられ詳細な検討を経て、2029 年頃以降にプロジェクト化され SKA 望遠鏡への展開されることになるだろう。

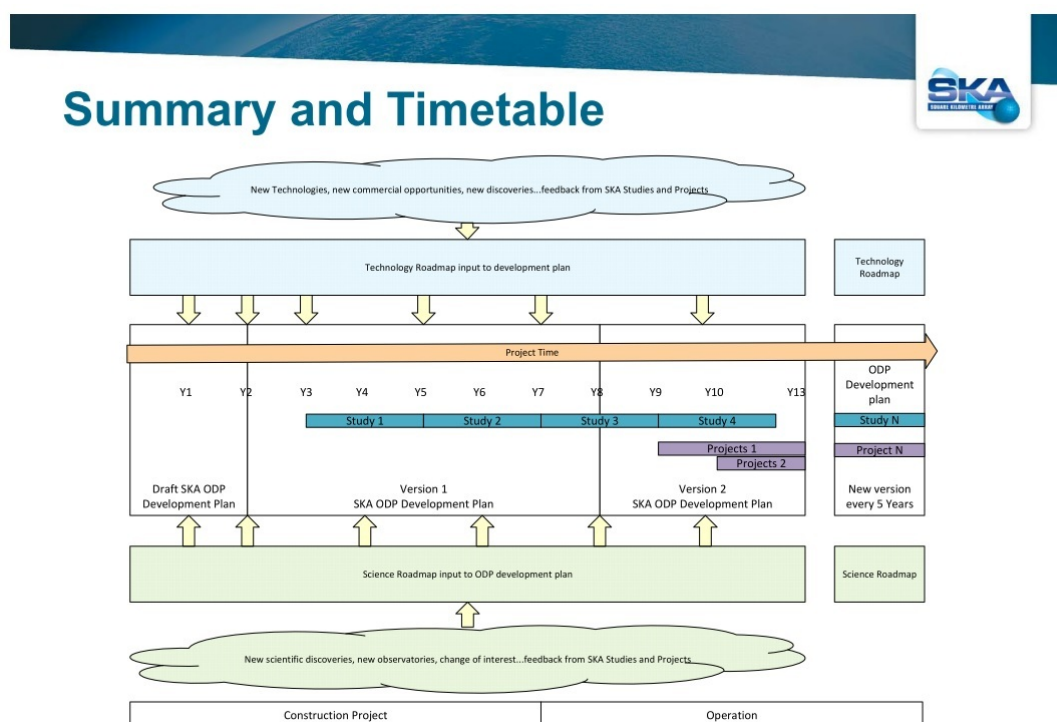


図 6.1.3: SODP スケジュール [109]。Y は SODP 開始の年からの経過年を示し、本レポート執筆時は Y1=2021 と想定される

ASPF[110]

これまで SKA の受信機開発はワークパッケージコンソーシアムの枠組みの中で DISH や WBSPF (Wide Band Single Pixel Feed) など主として議論されていた。それぞれの CDR 等が終わりワークパッケージコンソーシアムは現在活動を終了している。そこで SODP が開始されるまで、シングルピ

クセル受信機開発を継続的に議論を行うグループがスウェーデンチャルマーズ工科大学を中心に形成された。そのグループを ASPFR (Advanced Single Pixel Feed and Receiver) という。2019年9月には第一回ワークショップがチャルマーズ工科大学で開催された。ワークショップでは SKA 受信機にかかわる多様な技術の紹介が行われた。ASPFR のスコープについても議論され次のようなアイテムが挙げられた。

- WP1 – ASPFR Program Management
- WP2 – Science
- WP3 - Wide Band Feeds and LNAs
- WP4 - Advanced Octave feeds and LNAs:
- WP5 - Wideband Receivers:
- WP6 - Cooling technologies
- WP7 - Site survey

このワークパッケージのなかで Band 6 は WP4 に相当する。WP4 はほかに Band 3,4 や Band 6 よりも高周波である Band 7 (25-49 GHz) 等を含む。SKAJ も Band 6 の検討結果を発表し、日本の Band 6 での貢献への関心を表明している。SODP が開始される前まではこの ASPFR のグループと協力して Band 6 の搭載の検討を進めることが重要である。また SODP によるサイエンスロードマップの検討の際に Band 6 の重要性が取り込まれるための準備も進めておく必要がある。そして SODP がスタートし SKA の将来開発テーマの一つに Band 6 が採用され本格的な展開に進むことが期待される。

国内グループによる準備研究

SKAJ と大阪府立大学、JAXA は協力して Band 6 の基礎開発研究を進めてきた。

給電フィードに関しては、Band 5b 以下のバンドで採用されているのは Axially Corrugated horn 採用した。周波数比が 1.8 倍程度までカバーでき、偏波特性が優れているためである。まず SKAO より DISH の電磁界シミュレータ用のモデルを入手し (図 6.1.4)、パラボラアンテナの反射面は GRASP ソフトウェアに組み込んだ。フィードのモデルは CHAMP ソフトウェアを用いた。これらを組み合わせて解析を進めることでフィードのデザインパラメータの最適化を行った [111]。この解析と最適化により、DISH に搭載した際に開口能率が 0.65 以上で、周波数帯域のほぼ全域にわたって 0.75 以上が可能であることが分かった (図 6.1.5)。Axially Corrugated horn のデザインパラメータは非常に多岐にわたるがこの解析ではコルゲートの幅、深さ等限られたパラメータしか最適化を行っていない。したがって解析を進めることで更なるデザインが得られる可能性はある。これらのシミュレーションの環境整備、実行、最適化などは大阪府立大学と JAXA によって行われた。

OMT に関しては、大阪府大が所有する高周波の電波望遠鏡の開発実績が SKA にも適応できる可能性があることが分かった。特に先行研究 [112] などによって開発された立体導波管を使った OMT (6.1.6) は SKA Band 6 の周波数比約 1.8 に迫る性能を示している。これは周波数分だけスケールダウンすることによって SKA の性能が満たせる設計が可能であることを示している。

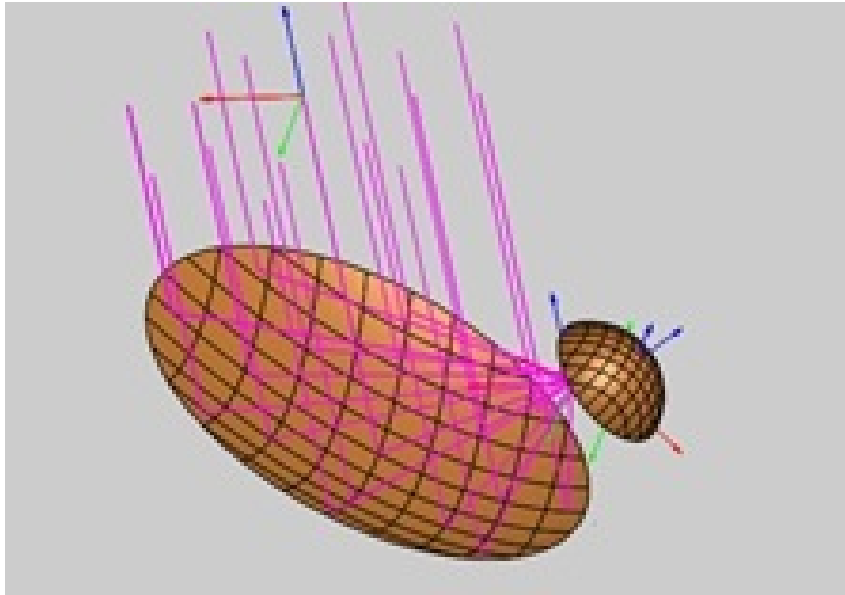


図 6.1.4: SKA/MID/DISH GRASP model

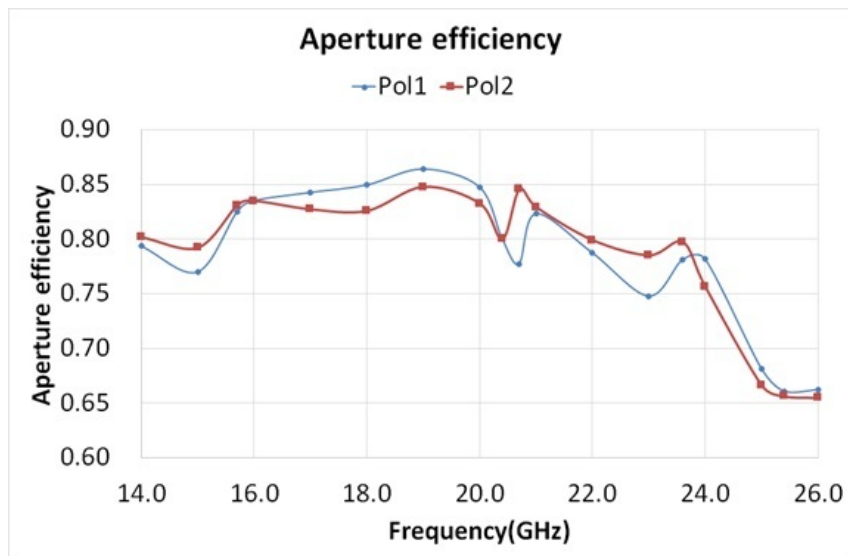


図 6.1.5: SKA/MID/DISH モデルと Band 6 の Axially Corrugated horn を使った電磁界シミュレーションによる開口能率の初期解析

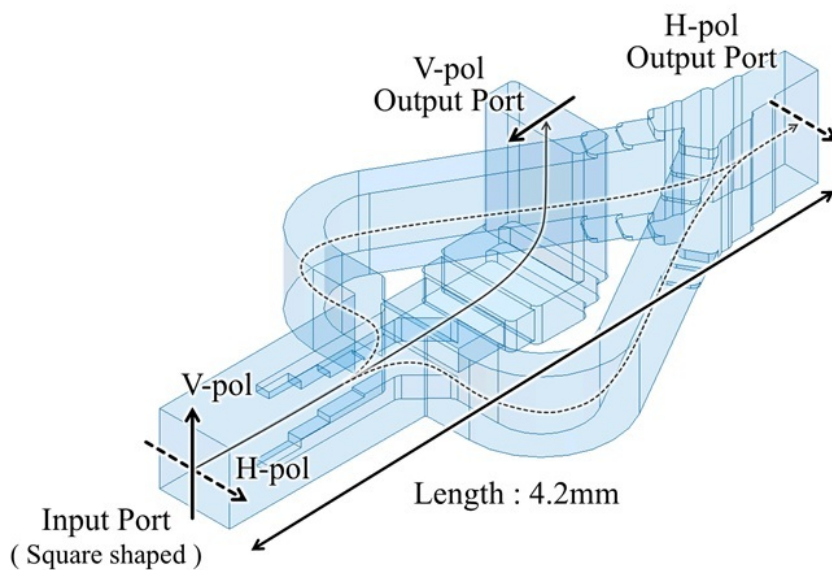


図 6.1.6: 大阪府立大学による立体 OMT の電磁界モデル図

6.1.6 まとめ

これまで Band 6 の受信機開発による SKA の貢献について調査を進めてきた。また電磁界シミュレータを用いた基礎的な設計も進んでいる。

しかしながら Band 6 の SKA への搭載は SKA1 のスコープ外であり、今後 SODP の枠組みで議論されることになる。またエンジニアリングロードマップだけでなく、サイエンスロードマップの両面で、他の開発要素との優位性も重要となる。今後は ASPFR をブリッジング活動とし準備を進め、SODP の場で国際的な議論を進めていく必要がある。

著者一覧（○は編集責任者）

○河野裕介 国立天文台

第7章 SKA-VLBI

執筆: VLBI 検討 WG

本章では、SKA-LOW, SKA-MID それぞれでアレイ全体を1つの VLBI 観測局として使う形態を“SKA-VLBI”として定義する。SKA-VLBI は、VLBI として世界で最高の感度、必要とあらば複視野を獲得する手段として実現する事が求められる。SKA-LOW, SKA-MID 本体の基本的性能は、これを実現する様に設計されているが、VLBI 局としての機能についてまで設計検討が必要であり、その部分に SKA-JP からの寄与が考えられる。一方、VLBI 観測を成立させるた為には、相手となる観測局と同期したこれらアレイの運用が求められる。VLBI 参加局間で同意が得られる運用モデルを構築すること、さらに必要ならば SKA-VLBI へ参加する観測局を新たに立ち上げる事もまた、技術開発事項と考えられる。

SKA-VLBI は、SKA で掲げられている主要科学課題の価値を超高解像度撮像の面から高めるだけでなく、SKA-VLBI によって独自に展開される科学目標も存在する。従って、SKA-VLBI は観測手段としてだけでなく科学課題の1つとして捉える考え方がある。また、SKA-VLBI 側で開発・整備が進んでも相手局はその一部としか整合性が取れない、という現実もある。SKA-VLBI に対する性能や運用モデルの設計においては、これらの状況も踏まえながら最も経済的・効率的なシステムを検討する必要がある。

7.1 SKA-VLBI システム構成

SKA における VLBI 機能は 2021 年時点で正式にプロジェクトに位置づけられておらず、SODP (SKA Observatory Development Program) という第二期装置計画の中で設計・開発されることが期待されている。その場合、段階的アレイ建設計画 (Roll-out Plan) 中 Array Assembly 4 (AA4)、つまり 2027 年より、開発された部位の搭載や試験が開始される予定である。しかし当初の設計段階から、CSP (Central Signal Processor) をはじめ多くの装置構成要素で VLBI 機能を含めることを見越して、システムとして満たすべき条件をまとめた文書 Level 1 System Requirement[5] にて VLBI と関連付けられた要求が既に多数定義されている。

図 7.1.1 は、SKA システムの中で VLBI 観測を実現する為に必要な要素がどの部分で取り込まれているかを示している。SKA の VLBI システムは、MID, LOW 両アレイそれぞれで受信した信号を、CSP で phase-up を行い (つまり任意の単独あるいは複数視野に合わせて VLBI beams を合成する)、かつデジタル変換・周波数帯分割をした上で、VDIF (VLBI Data Interchange Format) のパケットとして合成信号を SPC (Science Processing Center) にある VLBI 用超高速レコーダーに記録するものである。記録されたデータは、SKA-VLBI 用外部相関器センターへネットワークにて伝送され、他の VLBI 局で取得したデータと合わせて相関処理が行われる。同時に、干渉計としての Visibility、補正テーブル等が SDP (Science Data Processor) で作成され、合わせて外部相関器センターへと送られる。これらの処理は、VLBI 用スケジュールファイルを用いて、SKA の共通

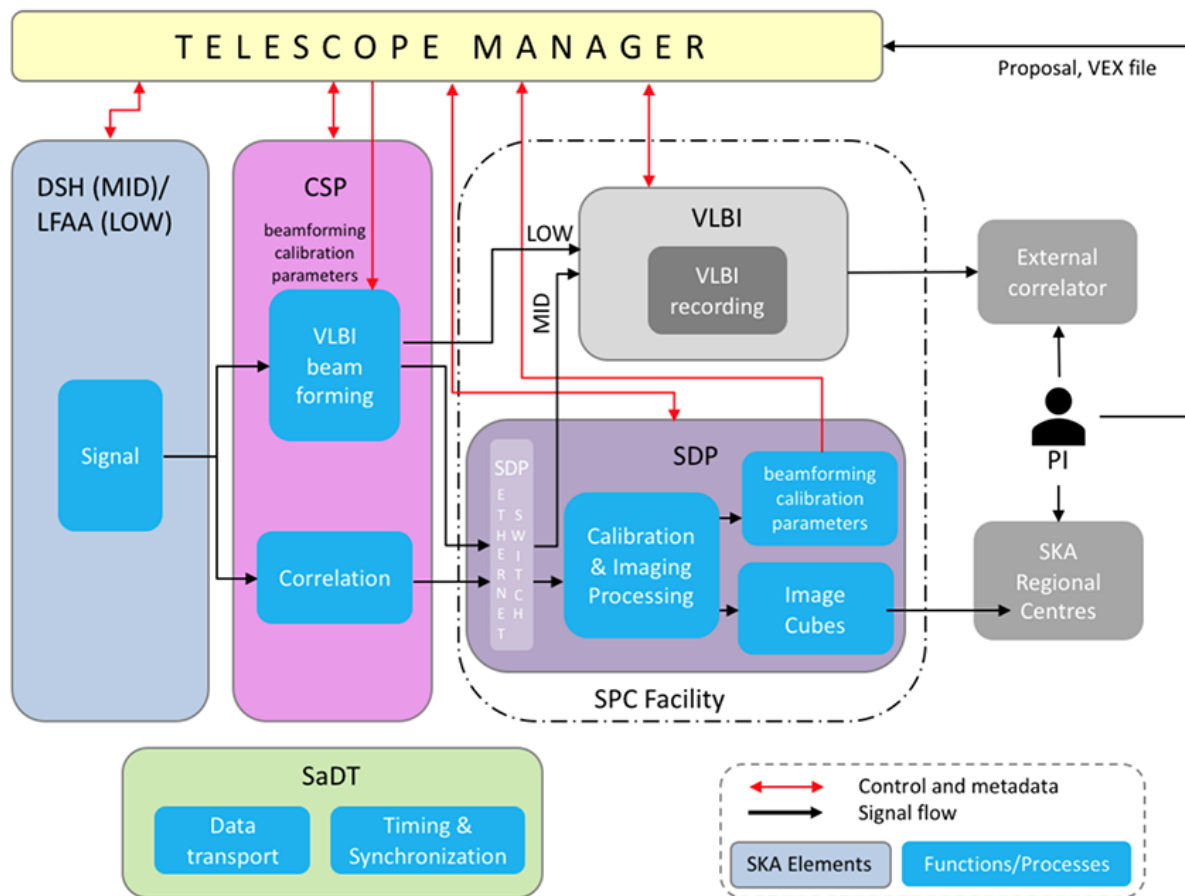


図 7.1.1: SKA1 観測所における SKA-VLBI を実現させる構図。[113]

言語である Tango（オープンソースデバイス指向制御 ツールキット）をベースとした運用ソフトウェアで統一的に処理される。

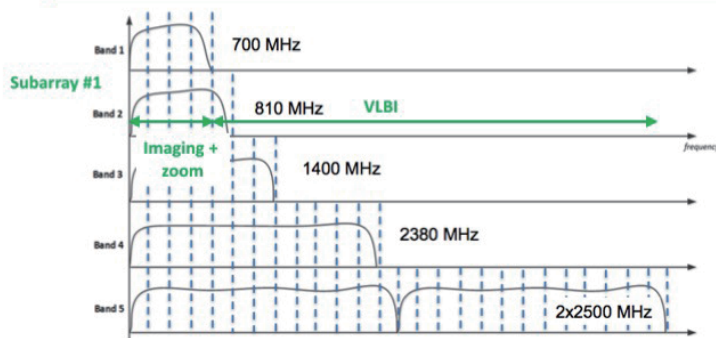
観測モードは、観測周波数バンドそれぞれに対応したものになるが、単独／両円偏波、狭／広帯域幅、単独／多数ビームのオプションから複数の組み合わせパターンを完全同時に実現させて観測を同時進行させることが可能となっている。以下これらのオプションについて詳細に取り上げる。

各 station (SKA1-LOW) 及び電波望遠鏡 (MID) からの信号は、デジタル変換した上でフィルター (Frequency Slice Processors=FSPs) を通して所定の周波数帯域幅 (200 MHz) まで分割される。複数の sub-arrays からの受信信号を異なる FSPs を使って並行して処理することもできる。ここでは分割された信号それぞれを stream と呼ぶことにする。これら stream のデータは、imaging、pulsar search (PSS)、pulsar timing (PST)、VLBI の 4 モードから 1 つの形式で処理が進む。FSPs は全部で 26 セットあり、実際はその一部が VLBI モードに費やされることになる。図 7.1.2 では、これら FSPs を分割利用する具体例を 3 つ提示している。

VLBI ビームについて、図 7.1.3 及び 7.1.4 では、SKA1-MID 及び LOW における VLBI ビーム合成の概念図を示している。SKA では MID でも LOW でも、アンテナ素子（それぞれ口径 15 m パラボラアンテナと log-periodic アンテナの単位集合体 = station）が成す広い視野の中で phase-up の手法を用いて集光する任意の狭視野を複数作り出すことができる。この狭視野が 1 つ 1 つの「VLBI

Simultaneous Observing with SKA1-MID:
GAL-OH project

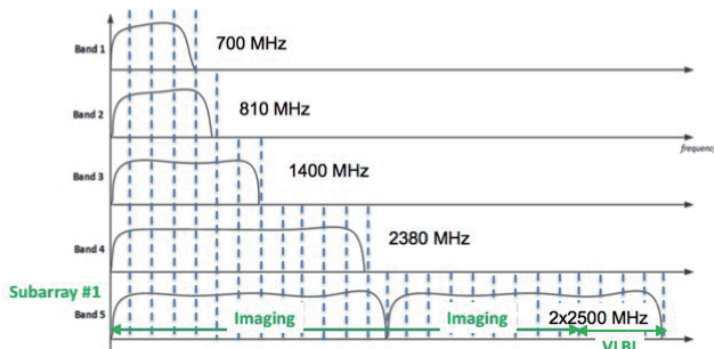
Subarray	Band	Continuum Imag BW (MHz)	# Zoom Windows	# PSS Beams	PST BW (MHz)	# PST Beams	VLBI BW (MHz)	# VLBI Beams
1	2	500 (3 FSP)	1 (1 FSP)				500	14 (21 FSP)



Band 2 で OH メーザー (1612, 1665, 1667, 1720 MHz) と位相参照連続波を観測。Sub-array 1つで、14 視野を 500 MHz の帯域幅で VLBI モードで観測。また SKA 単体で OH メーザー源も撮像。

Simultaneous Observing with SKA1-MID:
YSClust-MID project

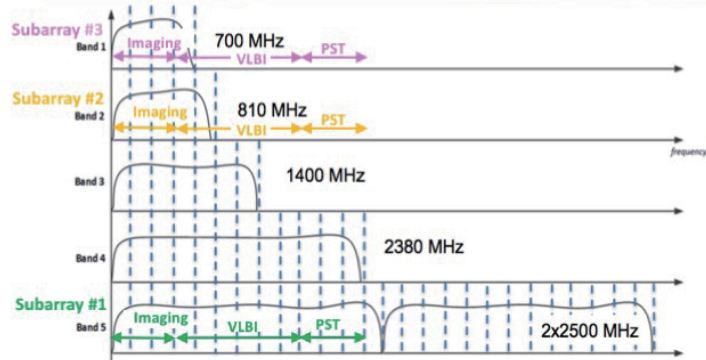
Subarray	Band	Continuum Imag BW (MHz)	# Zoom Windows	# PSS Beams	PST BW (MHz)	# PST Beams	VLBI BW (MHz)	# VLBI Beams
1	5	4.4 GHz (22 FSPs)					400	4 (4 FSPs)



Band 5 で young stellar objects (YSO) に付随する連続波を観測。SKA 単体での連続波源撮像がメインだが、4 視野を 400 MHz の帯域幅で VLBI モードでも観測。

Simultaneous Observing with SKA1-MID:
SCINT-MID project

Subarray	Band	Continuum Imag BW (MHz)	# Zoom Windows	# PSS Beams	PST BW (MHz)	# PST Beams	VLBI BW (MHz)	# VLBI Beams
1	5	500 (3 FSPs)			500 (3 FSPs)	1	500	4 (6 FSPs)
2	2	500 (3 FSPs)			500 (3 FSPs)	1	500	4 (6 FSPs)
3	1	500 (3 FSPs)			500 (3 FSPs)	1	500	4 (6 FSPs)



Band 1, 2, 5 でパルサーを観測する為に3つの sub-array を編成。シンチレーションを測定する為に、SKA 単体で撮像しつつ、VLBI モードでも pulsar timing (PST) モードでもデータを同時取得。

図 7.1.2: SKA1-MID の Science Use Cases のうち、持てる FSPs を幾つかの観測モードに分配して利用することを想定している代表例 [114]。点線で区切られた区画はそれぞれ 200 MHz の帯域幅を表す。矢印の範囲は、実際に使用する FSPs の数を反映している。

ビーム」に対応しており、各ビームからの信号の波形は各 stream に対応し、その単位で高速デジタル記録される。これらビームのサイズは、phase-up に利用したアンテナ素子の展開距離で決まる。展開距離が長くなると VLBI ビーム、つまり VLBI 局としての視野が極端に狭くなる。従って、SKA1-LOW、MID それぞれにおいて、アレイ中心部に密集している全体の約 7 割の望遠鏡を使って phase-up する（文献 [114] の Table 2-7）。この状況では、相関処理における visibility 積分時間 (accumulation period) を十分短くとれば、1 stream についてビームサイズ程度の視野を撮像できる VLBI visibility を生成できるはずである。

高精度電波源位置計測の場合なども含めて、同時に生成される複数の stream に対して相関処理を行う様な場合が多くを占めるだろう。もし、26 FSPs からの信号を全て VLBI モードで記録する場合、41.6 Gbps の記録速度が必要となる（2 偏波同時受信、2-bit & Nyquist sampling を仮定）。また VLBI モードの拡張として、将来最大 520 ビームを 16 のサブアレイで形成し、812.5 Gbps での記録をサポートする事が計画されている。

7.2 システム要件を満たすための課題・目標

先の章で外観した SKA-VLBI が達成すべき性能や機能を踏まえて、SKA-JP としては以下の課題に重点的に取り組む。

1. SODP を通した SKA-VLBI 機能追加による SKA への貢献、観測時間の獲得

(A) CSP-VLBI モードの構築と Commissioning and Verification

CSP に VLBI beam forming (phase-up) 機能 (VLBI モード) を持たせることになっているが、imaging、PSS、PST モードと 26 台の FSPs を共有するパターンは多様である。SKA-VLBI を利用する Science Use Cases が既に 30 件紹介されている [114] が、それぞれの提案がほぼ独立した FSPs 共有パターンを提示している。その中で SKA-JP からの提案は共同提案も含めて 3 件であり (2018 年時点)、その後 SKA-JP 内からさらに use cases が提案されている。そこで、これら新提案のものも含めて、CSP の詳細な現行仕様の中で実現できない FSPs 共有パターンを明らかにし、それらを実現する機能を追加していく必要がある。また CSP-VLBI の機能は仕様として定義され搭載されるが、運用ソフトも合わせた組み込み (Assenbly)、評価 (Commissioning and Verification) の完遂も大変重要な課題と目標の一つである。

(B) VLBI 用高速レコーダーの開発と搭載試験

SKA1 Level 1 System Requirement[5] にて、初期最大必要記録レートは SKA1-LOW と MID で各々 40 Gbps、100 Gbps、拡張時には 150 Gbps、900 Gbps が想定されている。現状の記録装置の記録速度 (≥ 32 Gbps) を大きく超える事から、当面はこれら VLBI 用高速記録装置を複数台導入することで対応する事を想定しつつ、将来的にはより高速なレコーダーを開発整備する必要がある。

(C) SKA-VLBI モード運用ソフトウェアの開発と搭載

SKA-VLBI モードも含め、SKA 観測システム全体の運用は SKA Observatory 主導で行われる。しかしながら、SKA-VLBI モードを伴う場合は、VLBI バックエンドの操作、信号記録データや visibility 較正用データのネットワーク転送、観測ログの転送・保管など、VLBI モード特有の運用項目が追加され、それら項目も含めた運用手順を構築

するためのソフトウェアの開発が必要となる。現在は NRAO SCHED 等によって VLBI 観測運用指示書ファイルが生成され、各観測局ではそれらファイルに基づいて FS9 等で望遠鏡や VLBI 観測機器の操作を制御する指示書ファイルが生成され、遠隔・定常操作が実行される。SKA-VLBI 実現においては、これら又はこれらに相当する新しいソフトウェアに SKA-VLBI の運用に関わる項目を持たせる必要がある。

2. SKA-VLBI 対応 VLBI 局の構築

SKA-VLBI の超高感度を活かすには、共に VLBI 観測に参加する相手局の性能向上や新規 VLBI 局の開拓が同時に必要となる。そこで、SKA1-LOW 及び MID とそれぞれほぼ同じ経度にある EAVN（東アジア VLBI 観測網）や欧州 VLBI 観測網 (EVN) との共同観測の実現が鍵となる。しかし、SKA1-LOW に対して同じ周波数バンドで観測できる局は、現状日本も含めて東アジアには少ない。南天の一部の天体については SKA1-MID と EAVN の共同観測は可能であるが、少なくとも日本については SKA1-LOW と状況が同じである。新望遠鏡を建設するというアイデアもあるが、VERA や JVN、飯館、白田など、既存の望遠鏡の機能拡張により共同観測を実現することが近道であると考えられる。既に SKA1 周波数バンドの一部で観測できる比較的最寄りの Precursor 局 (MWA、ASKAP) や Pathfinder 局 (GMRT、FAST 等) との試験観測や初期科学成果の創出が可能であろう。これら通して、SKA-VLBI を実現する実力を付けることが不可欠である。

3. SKA-VLBI 用相関器試作器開発、相関局構築

他のモードとの併行観測を含めて多くの機能を兼ね備える SKA との VLBI 観測では、常時 10 局以上が現状の性能を遥かに超えた信号記録速度 (1-4 Gbps \Rightarrow 8-32 Gbps) で参加する VLBI 観測を想定していなければならない。この様な VLBI 観測のデータを処理する外部相関器センターの建設も大きな課題である。現在運用されている大型相関器 (JIVE、KJCC、Haystack、Bonn 等) を拡張して SKA-VLBI 用相関器として運用することが、まず想定される。しかし、これらのいずれもが SKA1-LOW や MID から地理的に離れているので、VLBI 観測後のデータ転送の手段が問われる。もしコストが最も抑えられるのであれば、外部相関器センターを SPC 内に設置することも考えられる。実際、データ転送コストは同じ経路をデータを往復させる状況で見積もられるが、SPC から SKA Regional Centers へのデータ転送に比べてその逆向きのデータ転送量は圧倒的に少なく、この経路を使って VLBI 参加局からの信号を転送した方がコスト追加が抑えられると期待される。

7.3 日本の経験（開発・準備状況）と計画

7.3.1 SKA-VLBI システムへの取り組み

SKA の VLBI 対応については、JIVE (the Joint Institute for VLBI ERIC) にて先行的に SKA と連携し検討が進められており、CSP の VLBI 仕様と VLBI システムと各装置 (運用ソフトウェア含む) 間のインターフェースについての仕様等を検討した報告書 (WP10.1) が 2018 年 11 月に発行されている。国立天文台 SKA1 検討 G では 2019 年 8 月より JIVE との会合を開始し、2020 年 2 月に JIVE を訪問、集中的に打合せを行い、その後も継続して会合を持っている。そこで今後の SKA-VLBI を国際的に進める枠組みとして SKA-VLBI Consortium の設立、また超高速レコーダーの設計、試験方法、SKA Precursor、Pathfinder との VLBI 試験について議論、情報共有が行われた。また日

本の SKA-JP に SKA-VLBI WG が 2020 年 9 月に設営、月 1 回平均の会合が開催され、科学運用、SODP 提案準備検討、試験観測の推進、国立天文台 A project 提案について議論が行われてきた。

7.3.2 日本の活動提案

日本の VLBI コミュニティは超高速レコーダー、光伝送装置、相関器等の VLBI 用装置群を独自に開発、立ち上げ、評価を実施し、VERA、JVN のみならず、国際共同プロジェクトである EAVN 等の共同利用運用に供してきた。その経験と蓄積を踏まえ、SKA-JP では SKA-VLBI の活動として以下を提案する。

AIV 活動を通じた CSP-VLBI モードの構築、検証

日本は SKA-MID, LOW 両アレイの AIV に Tier2（メンバー国に準ずる）として参加し、CSP の様々なモード（PSS、PST 等）の立ち上げ、評価を行う予定である。その為 CSP-VLBI モードを構築、検証する事は、AIV の立ち上げ評価活動からスムーズに発展する事が可能である。また日本の VLBI グループは相関器、デジタルシステム開発、運用実績も豊富なため、競争力をもって寄与可能な分野である。SKA-VLBI モードは、2027 年度より試験開始である事から、2025 年度までは SKA 本体の AIV 活動にて経験を積みつつ、SKA-Consortium での議論を通して 2025 年度より立ち上げを開始し、2027 年度に CSP-VLBI モードの試験運用開始を目指す。

超高速レコーダーの開発、配備

初期の SKA-MID, LOW VLBI ではそれぞれ約 100 Gbps、40 Gbps の VLBI 用高速レコーダーが必要となる。現在世界で定常運用されている広帯域 (≥ 16 Gbps) VLBI 用レコーダーは Mark6 (VLBA)、Flexbuffer (EVN)、VSREC/OCTADISK2 (VERA、JVN、EAVN) の 3 種である。VLBI 用記録レコーダーはテープベースからハードディスクドライブ、VSI (VLBI Standard Interface) から 10 GbE と汎用品の記録速度の変遷に合わせて近年開発が進められてきた。現在では VLBI 用レコーダーは基本的に COTS (commercial off-the-shelf) ベースの開発となり汎用サーバーを用いたソフトウェアレコーダーが主流である。しかしながら Raid の方式、パリティ制御、プラットフォームとなる OS 等は異なる。また現在用いられているレコーダーは 10 GbE をベースとした構成となっているが、SKA-VLBI 時代には 40, 100 GbE に対応したものが要求される。そこで SKA-VLBI Consortium での協議を基に、各種レコーダーのハードウェア部を統一し、最新の OS を選択プラットフォームとした上で、各種ソフトウェアを同時または選択して起動、動作可能とする事で、相互互換性を保った 100 GbE を基本とする超高速レコーダー (≥ 64 Gbps) の開発が可能と想定される。2024 年度までに SKA-VLBI 用レコーダー初号機 1 台を制作し、2026 年度までに本作器 10 台を制作、配備する事で、2027 年度からの試験観測に備える事を計画している。

SKA-VLBI 用運用ソフトウェアの整備

日本の VLBI グループは、古くは drg 形式、現在は vex 形式と当時の VLBI 世界標準のスケジュール記載標識に則り動作する各種装置の制御、局運用、網運用ソフトウェアを独自開発し、国内の JVN、VERA 等で用い実績を積んできた。SKA-VLBI においては、これまで培ってきた経験と知

識を生かし、SKA-VLBI-Consortium での協議のもと、Tango ベースの VLBI 運用ソフトウェアの仕様、設計を 2024 年度末までに完了し、2026 年度末までに制作完了、配備を行い 2027 年度からの試験観測を可能とするべく計画している。

SKA-VLBI 局の整備

SKA-VLBI に対応した日本の既存 VLBI 局として SKA-MID 対応 (L-band) は白田 64m、水沢 20m、石垣 20m 望遠鏡、SKA-LOW 対応として東北大学飯館局 31m 鏡、名古屋大学豊川 108 m Cylindrical アンテナ等がある。SKA-LOW-VLBI 対応の MHz 帯 VLBI では、NICT、東北大学、名古屋大学の研究者らにより、飯館、豊川アレイでの整備、試験観測が行われ、2017 年 3 月に初フリンジ検出を達成している。また MWA、GMRT の国際 VLBI 実験が欧米、インドの研究者により成功された事から、東西方向に基線を拡張するべく日本の飯館局との低周波 VLBI 観測の実現に向け、GMRT グループと SKA-JP VLBI SEWG との間で会合、準備研究が行われている。今後上記に加えて、WG では FAST、LOFAR、ASKAP 等も加えた国際実験、サイエンス観測を行うべく、関連する既存局 (海外局含む) を定常的に VLBI 可能なシステムに更新し、来るべく SKA 時代の VLBI 観測に備えるべく活動を継続している。

SKA-VLBI 用相関局の整備

SKA-VLBI の時代には多視野、広帯域観測が主流となり、1 局当たりの信号記録速度は 80 Gbps を超える。現在 80 Gbps、10 数局を処理する相関器、相関局は存在しない。そこで国際協力を前提とした相関器の開発、相関局の整備が必要となる。マルチビーム観測の相関処理、相関器開発では、FFT 後に遅延追尾を行う、または相関積分時間を短くする等の工夫が必要となり、また実装時の各演算ロジック間の通信、巨大な出力データレート、演算プロセッサとして GPGPU、FPGA 等を適切に選択する等を加味した総合的な検討が必要となる。日本の VLBI コミュニティでは、天文台三鷹キャンパスに VSOP、VERA、JVN データ処理用の相関器として FX ハードウェア相関器を開発、三鷹キャンパスで 20 年間運用し、その後 NICT と共同で開発したソフトウェア相関器を 2015 年より水沢キャンパスで定常運用を行っている。また国際的には韓国 KVN と VERA との共同アレイである KaVA、そして中国、その周辺地域の望遠鏡まで含めた EAVN の相関器として KJCC を韓国 KVN メンバーと共同で開発、定常運用の実績がある。また NICT では 1990 年代初頭から各種プロジェクトに使用されたハードウェア、ソフトウェア相関器開発、運用の経験がある。これらの日本の VLBI コミュニティの相関器開発、運用における経験と知識を生かし、先に述べた相関器センターの SPC への設置も含め、120 Gbps、20 局相当の相関器センター設立を行うべく、SKA-Consortium、各地域の相関センターと協議のもと、実現に向け検討を継続している。

著者一覧（○は編集責任者）

○小山友明	国立天文台
赤堀卓也	国立天文台
今井 裕	鹿児島大学
氏原秀樹	京都大学／情報通信研究機構
亀谷 收	国立天文台
川口則幸	国立天文台
河野裕介	国立天文台
小林秀行	国立天文台
寺家孝明	国立天文台
新永浩子	鹿児島大学
高橋慶太郎	熊本大学
岳藤一宏	宇宙科学研究所白田宇宙空間観測所
土居明広	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
中西裕之	鹿児島大学
新沼浩太郎	山口大学
橋本哲也	清華大学
秦 和弘	国立天文台
林 隆之	国立天文台／麻布中学校・高等学校
廣田朋也	国立天文台

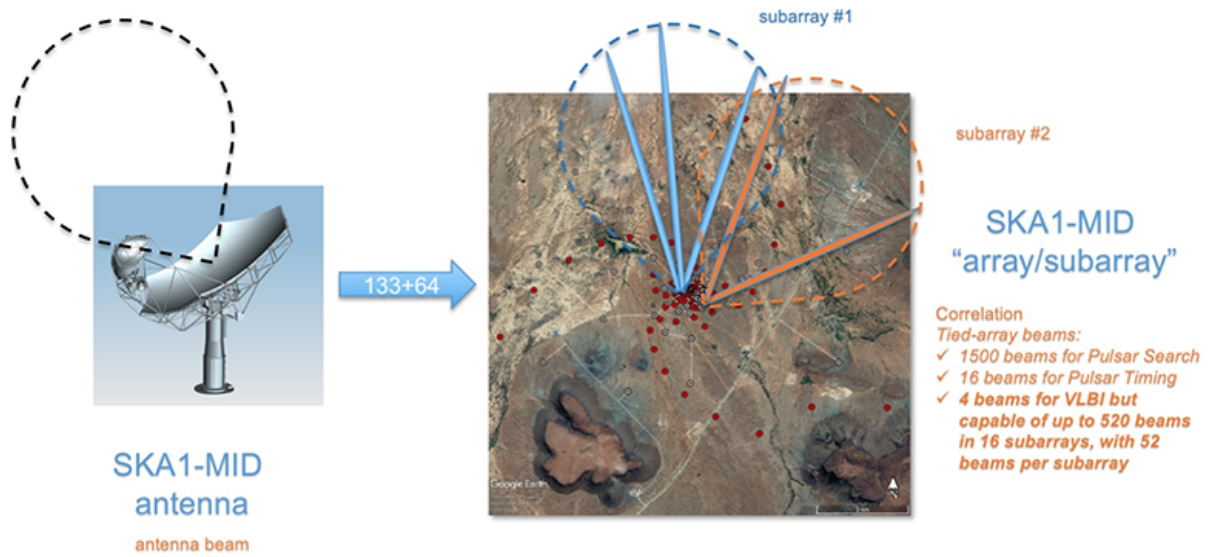


図 7.1.3: SKA1-MID における sub-arrays 編成及び VLBI beams 合成の概念図 [114]。

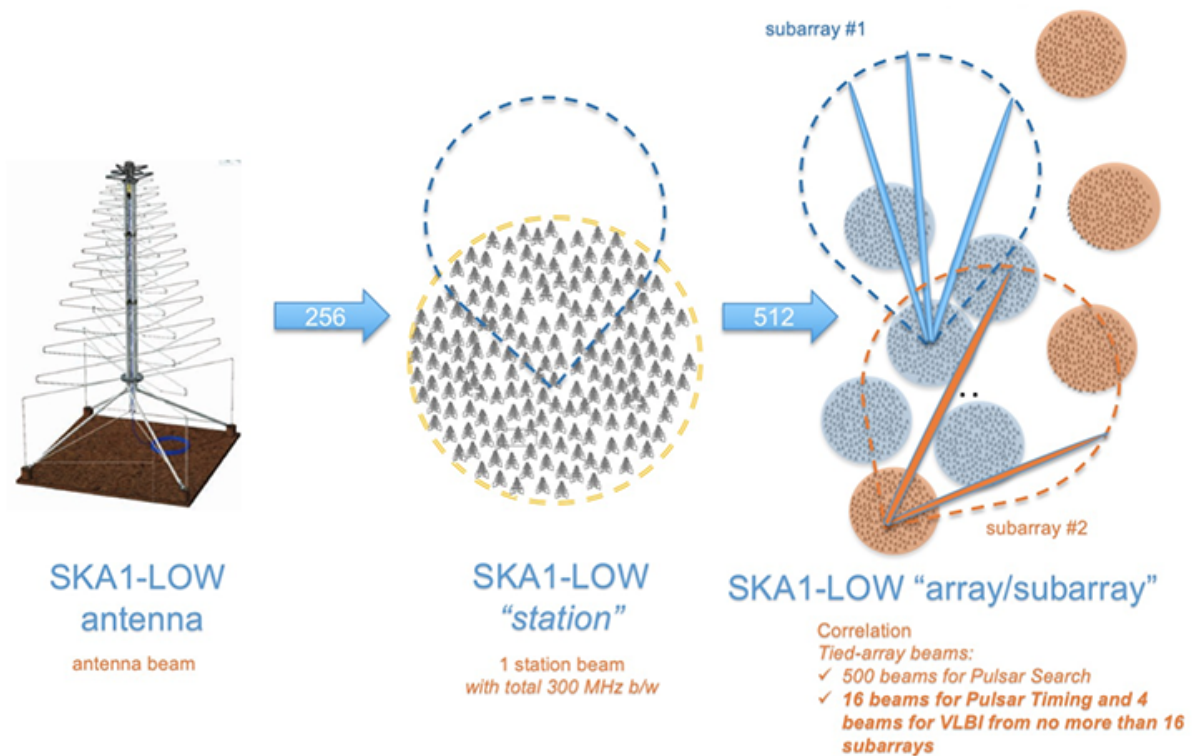


図 7.1.4: SKA1-LOW における sub-arrays 編成及び VLBI beams 合成の概念図 [114]。

第8章 On-the-Fly Interferometry

執筆: OtFI 検討 WG

8.1 SKA1 における OtFI 実装に向けた検討

SKA1 は従来の電波干渉計を凌駕するサーベイ能力を有し、時間領域天文学およびマルチメッセンジャー天文学時代における最も重要な役割を担うことになる期待されている。これらの新しい天文学の枠組みで重要な対象となるものは重力波天体や高エネルギーニュートリノ天体などの電磁波以外の手段で観測されるものをはじめとして、位置が正確にわからなく、かつ短時間に強度変動をするあるいは変動の時間スケールが分からない天体である。そしてこれらの天体を観測できること、が現代の天文観測システム構築の一つの重要な課題となっている。電波干渉計は高い感度と高い空間分解能を有するため、こういった天体の素性を知るために最も重要な観測装置の一つである。しかし電波干渉計観測にとってこのような観測を行うことは簡単ではない。その理由は(1)望遠鏡の視野が狭く、(2)広い領域の天体探査にはモザイク・マッピング観測が必要だが、そのためには長大な時間がかかる、というものである。

この問題を解決するのが、On-the-fly 干渉計 (On-the-Fly Interferometry: OtFI) mapping 法である。すなわち素子アンテナの視野を連続的に空間的に移動しつつ干渉計として動作させて天体を連続的に検出するという技法である。これが実現すると、広視野を干渉計の角度分解能で探査して点源の効率的な検出が可能となる。つまり位置決定精度の悪い天体現象に対し、電波干渉計により同領域を隈なく探査することで同現象の起源天体を特定できるようになり、マルチメッセンジャー観測に重要な貢献が可能となる。

SKA1-MID において現時点で同機能の実装は考えられていない。将来的な機能実装を目指した準備研究を行うことにより実装に必要な計算リソース等の検討を進めることが重要である。

8.2 OtFI 実装に向けた課題と目標

既存の電波干渉計であれば、例えば Jansky Very Large Array (JVLA) が OtFI の機能を用いて全天サーベイが行われている (VLA Sky Survey: VLASS) を実施している [116]。一方、干渉計を構成する電波望遠鏡の台数は JVLA の 27 基に対し、SKA1-MID は 197 基と JVLA の 7 倍以上、基線数については 50 倍以上となるため相関処理における計算機への負荷が非常に大きくなる。SKA1-MID における相関処理プロセスにおいて、SDP へ OtFI の機能を実装することが可能なのか、あるいは実装のためには、信号処理、ビジビリティの較正を含めた解析手法までを含め、計算機リソースへの要求を見極める必要がある。その上で、SODP (SKA Observatory Development Program) での議論や SKA2 を見越した長期的展望とともに検討を行う必要がある。

8.3 日本の経験（開発・準備状況）と計画

8.3.1 山口干涉計における OtFI の機能開発と観測の実施

SKA への OtFI 実装を見越した国内での実証実験として、山口大学、鹿児島大学、国立天文台が共同で、山口干涉計へコンパクト電波源の無バイアスサーベイを目指した OtFI mapping 法の開発研究を開始している。



図 8.3.1: 山口大学が運用する山口干涉計。右手前の口径 32m 電波望遠鏡および左奥の口径 34m 電波望遠鏡の 2 基からなる電波干涉計である。

この目的のために、ハードウェアとしてデータ記録・相関処理部の整備、ソフトウェアとして OtFI 観測の定常運用に向けたソフトウェアの開発が必要になる。この方法は、日本では初めての試みであり、実現した場合、国内の VLBI 観測によるサーベイにも応用される。本研究の科学的ゴールとして、5 平方度を 1 日で観測し、その範囲内のコンパクト電波源を一定の感度で検出することを目指している。

8.3.2 現状と今後の展望

研究目的の達成に向けて開発するソフトウェアは、情報通信研究機構が開発したソフトウェア相関器を基盤とする。また、国立天文台においても相関処理等ソフトウェアに関するノウハウが蓄積されているため、大学および国立天文台が共同研究を行うことで日本のコミュニティに経験が蓄積されていく。本研究のゴールは山口干涉計による観測であるが、開発された技法は日本

VLBI 観測網（JVN）、VERA、東アジア VLBI 観測網（EAVN）、SKA へ応用することを見込んでいる。これらの研究を推進している国立天文台と緊密な連携を図ることによって、他観測網へ応用する際の問題点をあらかじめ把握することができ、スムーズに研究の発展ができる。山口干渉計で実証実験を行った後は、JVN で本格的な研究に利用することを予定している。現在 JVN では時間領域天文学の発展を目指しており、そこで対象となるのはコンパクト電波源である。この研究に OtFI mapping 法は大変有効であると考えられる。また、VERA の広帯域観測に応用すると、位相補償参照電波源の探査にも有用である。さらに、SKA への実装が実現すればその潜在的な能力がさらに高められると予想される。したがって、この基礎技術を国内の大学および国立天文台がともに開発することには大きな意義がある。

著者一覧 (○は編集責任者)

○新沼浩太郎	山口大学
藤澤健太	山口大学
小林秀行	国立天文台

第9章 まとめ

9.1 おわりに

Square Kilometer Array 計画は最初の構想からおよそ 30 年の時間を経て、いよいよ 2021 年 7 月より SKA1 として建設が始まった。2020 年代末からの運用が期待される SKA1-Low および SKA1-Mid は、間違いなく次世代における代表的な天文観測装置の 1 つになるはずである。

日本においても将来 SKA を用いたメートル波・センチ波帯の有望な研究テーマが数多く提案されており、サイエンスブックとしてまとめられている [2]。国際協力の中で一定の主導権を握りながらこれらの科学成果を上げていくためにも、これまで日本 SKA コンソーシアムや国立天文台 SKA1 検討室を中心として計画段階からの参入を目指し検討が重ねられてきた。

本書では SKA 計画に日本として参入するにあたり、これまで長年にわたり日本の電波天文学で培われてきた技術的な独自性・新規性と、それを基にした SKA1 に対する技術的な貢献可能性についてまとめている。

第 2 章から第 4 章は、これまで、VLBI を含む大型の電波干渉計計画を立ち上げ、運用してきた実績を踏まえ、参入にあたり日本の独自性をどのような項目でどのように発揮できるか、また、日本の強みを最大限発揮できる科学項目において、これまでに検討・開発が十分に進んでいるソフトウェアなどでの貢献可能性についてまとめてあり、SKA 計画に参加できればすぐにでも貢献可能な項目が示されている。一方、第 5 章から第 8 章については SKA1 の段階で計画されている開発の範囲外ではあるものの、VLBI 機能など早い段階で SKA Observatory Development Program (SODP) の枠組みでの機能強化が期待されている項目や、基礎的実験中のものなども含め、日本の技術的独自性を活かし将来的に SKA 計画にも貢献が期待できる項目をまとめている。

SKA 計画への参加によって、国際的なプレゼンスの発揮というだけでなく、技術の継承という若手育成の観点からも非常に重要であるとともに、研究者コミュニティだけでなく産業界も含め、日本の科学界全体へ波及効果をもたらすことが期待される。

付録A SKA1 Level0 Science Requirements

ここではSKA1で取り組むサイエンスとサイエンスゴールを達成するために必要な装置性能の対応を示す。

表 A.0.1: SKA1 の科学目標を達成するための要求。Level0 Science Requirements [4] より引用。

Science Objective	SWG	High Priority Science Objective Number	SKA1 Component	Band	Mode	Frequency			Sensitivity		
						Range Low - High	Resolution Initial:Cal:Final	Spectral Dynamic Range (L_max/L_min)	RMS Noise Min:Max @ Beam @ Bandwidth	Brightness Dynamic Range (L_max/L_min)	Polarisation Dynamic Range (L_max/P_min)
EoR - Imaging AASKA14:001	CD/EoR	1	SKA1-LOW	N/A	Imaging	50 - 200 MHz	4:4:1000 kHz	50 dB	1.4:100 mK @ 300 arcsec @ 1 MHz	50 dB	45 dB
EoR - Power Spectra AASKA14:001	CD/EoR	2	SKA1-LOW	N/A	imaging/Power Spectrum	50 - 200 MHz	4:4:1000 kHz	50 dB	4.6:330 mK @ 300 arcsec @ 1 MHz	50 dB	40 dB
			SKA1-LOW	N/A	imaging/Power Spectrum	50 - 200 MHz	4:4:1000 kHz	50 dB	14:1000 mK @ 300 arcsec @ 1 MHz	50 dB	35 dB
Pulsar Searching AASKA14:040	Pulsars	4	SKA1-LOW	N/A	Non-Imaging	150 - 350 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	20 μ Jy/Beam @ 145 arcsec Cont	30 dB	25 dB
			SKA1-MID	SPF1	Non-Imaging	650 - 950 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	13 μ Jy/Beam @ 65 arcsec Cont	30 dB	25 dB
			SKA1-MID	SPF2	Non-Imaging	1250 - 1550 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	7 μ Jy/Beam @ 45 arcsec Cont	30 dB	25 dB
Pulsar Timing AASKA14:037	Pulsars	5	SKA1-LOW	N/A	Non-Imaging	150 - 350 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	10 μ Jy/Beam @ 8 arcsec Cont	30 dB	40 dB
			SKA1-MID	SPF2	Non-Imaging	950 - 1760 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	3 μ Jy/Beam @ 7 arcsec Cont	30 dB	40 dB
HI - High z AASKA14:128	HI	13	SKA1-MID	SPF1	Imaging	790 - 950 MHz	4:50 kHz	30 dB	16 μ Jy/Beam @ 2-10 arcsec Line	50 dB	35 dB
HI - Low z AASKA14:129	HI	14	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1300 - 1400 MHz	4:15:20 kHz	30 dB	14 μ Jy/Beam @ 2-10 arcsec Line	50 dB	30 dB
HI - Galaxy AASKA14:130	HI	15	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1415 - 1425 MHz	0.5:4 kHz	30 dB	75 μ Jy/Beam @ 2-10 arcsec Line	45 dB	30 dB
Transients - FRB AASKA14:055	Transients	18	SKA1-MID	SPF1	Non-imaging/Commensal	650 - 950 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	7 mJy/Beam @ 65 arcsec Cont	30 dB	25 dB
CoL - Planet formation AASKA14:117	Cradle of Life	22	SKA1-MID	SPF5	Imaging	8 - 12 GHz	80:80:4000 kHz	30 dB	80 nJy/Beam @ 0.04 arcsec Cont	40 dB	25 dB
Magnetism - RM-grid AASKA14:092	Magnetism	27	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:1000 kHz	30 dB	7 μ Jy/Beam @ 2 arcsec Cont	45 dB	30 dB
Cosmology - High z IM AASKA14:019	Cosmology	32	SKA1-MID	SPF1	Auto-correlations	350 - 1050 MHz	10:300 kHz	45 dB	3.3 mJy/Beam @ 1.7 deg Line	40 dB	40 dB
Cosmology - ISW, Dipole AASKA14:018, 032	Cosmology	33	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:1000 kHz	30 dB	7 μ Jy/Beam @ 2 arcsec Cont	45 dB	30 dB
Continuum - SFR(z) AASKA14:067	Continuum	37 + 38	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:1000 kHz	30 dB	1.3 μ Jy/Beam @ 0.5 arcsec Cont	60 dB	30 dB
			SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:10:1000 kHz	30 dB	0.25 μ Jy/Beam @ 0.5 arcsec Cont	60 dB	30 dB
			SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:10:1000 kHz	30 dB	65 nJy/Beam @ 0.5 arcsec Cont	60 dB	30 dB
			SKA1-MID	SPF5	Imaging	7 - 11 GHz	80:80:4000 kHz	25 dB	400 nJy/Beam @ 0.05 arcsec Cont	45 dB	30 dB
			SKA1-MID	SPF5	Imaging	7 - 11 GHz	80:80:4000 kHz	25 dB	50 nJy/Beam @ 0.05 arcsec Cont	45 dB	30 dB
L0 Requirements			001, 002, 004, 005		047, 048, 049, 050, 051, 052	024, 025, 026, 028	026, 028	022, 023	003, 006, 007, 008, 009, 010, 011, 012, 013, 014, 015, 033, 034, 035, 036, 037, 038, 043, 044, 045, 046	018, 019, 039, 040, 041, 042	020, 021

表 A.0.2: SKA1 の科学目標を達成するためのサーベストラテジー。Level0 Science Requirements [4] より引用。

Science Objective	SWG	High Priority Science Objective Number	SKA1 Component	Band	Mode	Frequency			Sensitivity		
						Range Low - High	Resolution Initial:Cal:Final	Spectral Dynamic Range (L _{max} /L _{min})	RMS Noise Min:Max @ Beam @ Bandwidth	Brightness Dynamic Range (L _{max} /L _{min})	Polarisation Dynamic Range (I _{max} /I _{min})
EoR - Imaging AASKA14:001	CD/EoR	1	SKA1-LOW	N/A	Imaging	50 - 200 MHz	4:4:1000 kHz	50 dB	1.4:100 mK @ 300 arcsec @ 1 MHz	50 dB	45 dB
EoR - Power Spectra AASKA14:001	CD/EoR	2	SKA1-LOW	N/A	imaging/Power Spectrum	50 - 200 MHz	4:4:1000 kHz	50 dB	4.6:330 mK @ 300 arcsec @ 1 MHz	50 dB	40 dB
			SKA1-LOW	N/A	imaging/Power Spectrum	50 - 200 MHz	4:4:1000 kHz	50 dB	14:1000 mK @ 300 arcsec @ 1 MHz	50 dB	35 dB
Pulsar Searching AASKA14:040	Pulsars	4	SKA1-LOW	N/A	Non-Imaging	150 - 350 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	20 μJy/Beam @ 145 arcsec Cont	30 dB	25 dB
			SKA1-MID	SPF1	Non-Imaging	650 - 950 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	13 μJy/Beam @ 65 arcsec Cont	30 dB	25 dB
			SKA1-MID	SPF2	Non-Imaging	1250 - 1550 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	7 μJy/Beam @ 45 arcsec Cont	30 dB	25 dB
Pulsar Timing AASKA14:037	Pulsars	5	SKA1-LOW	N/A	Non-Imaging	150 - 350 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	10 μJy/Beam @ 8 arcsec Cont	30 dB	40 dB
			SKA1-MID	SPF2	Non-Imaging	950 - 1760 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	3 μJy/Beam @ 7 arcsec Cont	30 dB	40 dB
HI - High z AASKA14:128	HI	13	SKA1-MID	SPF1	Imaging	790 - 950 MHz	4:50 kHz	30 dB	16 μJy/Beam @ 2-10 arcsec Line	50 dB	35 dB
HI - Low z AASKA14:129	HI	14	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1300 - 1400 MHz	4:15:20 kHz	30 dB	14 μJy/Beam @ 2-10 arcsec Line	50 dB	30 dB
HI - Galaxy AASKA14:130	HI	15	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1415 - 1425 MHz	0.5:4 kHz	30 dB	75 μJy/Beam @ 2-10 arcsec Line	45 dB	30 dB
Transients - FRB AASKA14:055	Transients	18	SKA1-MID	SPF1	Non-imaging/Commensal	650 - 950 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	7 mJy/Beam @ 65 arcsec Cont	30 dB	25 dB
CoL - Planet formation AASKA14:117	Cradle of Life	22	SKA1-MID	SPF5	Imaging	8 - 12 GHz	80:80:4000 kHz	30 dB	80 nJy/Beam @ 0.04 arcsec Cont	40 dB	25 dB
Magnetism - RM-grid AASKA14:092	Magnetism	27	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:1000 kHz	30 dB	7 μJy/Beam @ 2 arcsec Cont	45 dB	30 dB
Cosmology - High z IM AASKA14:019	Cosmology	32	SKA1-MID	SPF1	Auto-correlations	350 - 1050 MHz	10:300 kHz	45 dB	3.3 mJy/Beam @ 1.7 deg Line	40 dB	40 dB
Cosmology - ISW, Dipole AASKA14:018, 032	Cosmology	33	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:1000 kHz	30 dB	7 μJy/Beam @ 2 arcsec Cont	45 dB	30 dB
Continuum - SFR(z) AASKA14:067	Continuum	37 + 38	SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:1000 kHz	30 dB	1.3 μJy/Beam @ 0.5 arcsec Cont	60 dB	30 dB
			SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:10:1000 kHz	30 dB	0.25 μJy/Beam @ 0.5 arcsec Cont	60 dB	30 dB
			SKA1-MID	SPF2	Imaging	1000 - 1700 MHz	10:10:1000 kHz	30 dB	65 nJy/Beam @ 0.5 arcsec Cont	60 dB	30 dB
			SKA1-MID	SPF5	Imaging	7 - 11 GHz	80:80:4000 kHz	25 dB	400 nJy/Beam @ 0.05 arcsec Cont	45 dB	30 dB
			SKA1-MID	SPF5	Imaging	7 - 11 GHz	80:80:4000 kHz	25 dB	50 nJy/Beam @ 0.05 arcsec Cont	45 dB	30 dB
L0 Requirements			001, 002, 004, 005		047, 048, 049, 050, 051, 052	024, 025, 026, 028	026, 028	022, 023	003, 006, 007, 008, 009, 010, 011, 012, 013, 014, 015, 033, 034, 035, 036, 037, 038, 043, 044, 045, 046	018, 019, 039, 040, 041, 042	020, 021

付録B SKA1-LowおよびSKA1-Midにおける周波数ごとの感度

表 B.0.1: SKA1-Low において期待される周波数毎の感度。ステーションおよびアレイ全体での値をそれぞれ示す。[6]より引用。

観測周波数 MHz	各ステーションの感度 ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$) m^2/K	アレイ全体の感度 ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$) m^2/K
50	0.102	52.2
60	0.255	130.3
70	0.42	214.8
80	0.58	296.9
90	0.781	399.7
100	0.862	441.3
110	0.885	453.1
120	0.924	472.9
130	0.965	493.9
140	1.052	538.4
150	1.119	572.8
160	1.159	593.3
170	1.171	599.7
180	1.19	609.1
190	1.195	612
200	1.223	626.4
210	1.235	632.4
220	1.263	646.5
230	1.226	627.5
240	1.234	631.7
250	1.282	656.4
260	1.304	667.9
270	1.297	664.2
280	1.306	668.8
290	1.314	672.5
300	1.289	660
310	1.294	662.4
320	1.327	679.4
330	1.286	658.6
340	1.204	616.7
350	1.156	591.8

表 B.0.2: SKA1-Mid において期待される周波数毎の感度。アンテナ単体およびアレイ全体での値をそれぞれ示す。[6] より引用。

観測周波数 GHz	アンテナ単体の感度 ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$) m^2/K	アレイ全体の感度 ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$) m^2/K	備考
0.3508	2.208	293.7	Band1
0.3673	2.424	322.3	
0.3846	2.648	352.2	
0.4027	2.879	382.9	
0.4217	3.114	414.2	
0.4416	3.353	445.9	
0.4624	3.594	478.1	
0.4842	3.837	510.4	
0.507	4.078	542.4	
0.5309	4.316	574	
0.5559	4.55	605.1	
0.5821	4.779	877.1	
0.6095	5	918.2	
0.6383	5.209	957.4	
0.6683	5.404	994.4	
0.6998	5.581	1029	
0.7328	5.737	1060	
0.7674	5.869	1088	
0.8035	5.971	1112	
0.8414	6.037	1130	
0.881	6.072	1144	
0.9226	6.071	1124	
0.9661	9.324	1567	
1.012	9.47	1597	
1.059	9.59	1623	Band2
1.109	9.698	1647	
1.161	9.796	1671	
1.216	9.883	1693	
1.274	9.961	1713	
1.334	10.03	1733	
1.396	10.09	1751	
1.462	10.15	1767	
1.531	10.2	1781	
1.603	10.24	1792	
1.679	10.28	1799	
1.758	10.31	1804	

表 B.0.2: SKA1-Mid において期待される周波数毎の感度 (続き)。

観測周波数 GHz	アンテナ単体の感度 ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$) m ² /K	アレイ全体の感度 ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$) m ² /K	備考
1.841	10.34	1810	Band3
1.928	10.37	1814	
2.018	10.39	1818	
2.113	10.41	1821	
2.213	10.42	1824	
2.317	10.44	1826	
2.427	10.45	1828	
2.541	10.46	1829	
2.661	10.46	1830	
2.786	10.47	1831	
2.917	10.46	1830	
3.055	10.46	1392	
3.199	10.46	1392	
3.35	10.46	1392	
3.508	10.46	1391	
3.673	10.46	1391	
3.846	10.45	1390	
4.027	10.45	1390	
4.217	10.44	1389	
4.416	10.43	1388	
4.624	10.36	1378	Band5a
4.842	10.25	1363	
5.07	10.13	1348	
5.309	10.01	1332	
5.559	9.891	1315	
5.821	9.764	1299	
6.095	9.633	1281	
6.383	9.5	1263	
6.683	9.362	1245	
6.998	9.222	1226	
7.328	9.078	1207	
7.674	8.931	1188	
8.035	8.78	1168	

表 B.0.2: SKA1-Mid において期待される周波数毎の感度 (続き)。

観測周波数 GHz	アンテナ単体の感度 ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$) m ² /K	アレイ全体の感度 ($A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$) m ² /K	備考
8.414	8.617	1146	Band5b
8.81	8.461	1125	
9.226	8.299	1104	
9.661	8.138	1082	
10.12	7.97	1060	
10.59	7.801	1038	
11.09	7.617	1013	
11.61	7.446	990.3	
12.16	7.267	966.5	
12.74	7.084	942.2	
13.34	6.89	916.4	
13.96	6.7	891.1	
14.62	6.497	864.1	
15.31	6.295	837.3	

参考文献

- [1] SKAO Public Website: <https://www.skatelescope.org/>
- [2] 日本 SKA コンソーシアム科学検討班 (2020), 日本版 Square Kilometer Array サイエンスブック 2020, http://ska-jp.org/SKAJP_Science_Book_2020.pdf
- [3] SKA Organisation (2015), "Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array"
<https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2011/03/SKA-Astrophysics-Vol1.pdf> (Volume1)
<http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2011/03/SKA-Astrophysics-Vol2.pdf> (Volume2)
- [4] SKA1 Level 0 Science Requirements:
SKA-TEL-SKO-0000007 (2015-10-28), https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2014/03/SKA-TEL-SKO-0000007_SKA1_Level_0_Science_RequirementsRev02-part-1-signed.pdf
- [5] SKA PHASE 1 SYSTEM REQUIREMENTS SPECIFICATION:
SKA-TEL-SKO-0000008 (2020-06-17) https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2014/03/SKA-TEL-SKO-0000008-AG-REQ-SRS-Rev06-SKA1_Level_1_System_Requirement_Specification-P1-signed.pdf
- [6] ANTICIPATED SKA1 SCIENCE PERFORMANCE:
SKA-TEL-SKO-0000818 (2017-10-17), https://astronomers.skatelescope.org/wp-content/uploads/2017/10/SKA-TEL-SKO-0000818-01_SKA1_Science_Perform.pdf
- [7] SKA Phase 1 Construction Proposal
http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2021/02/22380_Construction-Proposal-DIGITAL_v3.pdf
- [8] INTEGRATION AND VERIFICATION PLAN FOR SKA1_LOW, SKA-TEL-AIV-4430001
- [9] ROLL-OUT PLAN FOR SKA1_MID, SKA-TEL-AIV-2410001
- [10] ROLL-OUT PLAN FOR SKA1_LOW, SKA-TEL-AIV-410001
- [11] Burn, B. J. 1966, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 133, 67
- [12] Brentjens, M. A., & de Bruyn, A. G. 2005, Astronomy & Astrophysics, 441, 1217
- [13] Högbom J. A., 1974, A&AS, 15, 417
- [14] Heald G., Braun R., Edmonds R., 2009, Astronomy & Astrophysics, 503, 409
- [15] O'Sullivan, S. P., Brown, S., Robishaw, T., et al. 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 421, 3300. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20554.x
- [16] Ideguchi, S., Takahashi, K., Akahori, T., et al. 2014, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 5. doi:10.1093/pasj/pst007
- [17] Miyashita, Y., Ideguchi, S., Nakagawa, S., et al. 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 482, 2739. doi:10.1093/mnras/sty2862
- [18] Li, F., Brown, S., Cornwell, T. J., et al. 2011, Astronomy & Astrophysics, 531, A126. doi:10.1051/0004-6361/201015890

- [19] Andrecut, M., Stil, J. M., & Taylor, A. R. 2012, *The Astronomical Journal*, 143, 33. doi:10.1088/0004-6256/143/2/33
- [20] Akiyama, K., Akahori, T., Miyashita, Y., et al. 2018, arXiv:1811.10610
- [21] Cooray, S., Takeuchi, T. T., Akahori, T., et al. 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 500, 5129. doi:10.1093/mnras/staa3580
- [22] Bell, M. R. & Enßlin, T. A. 2012, *Astronomy & Astrophysics*, 540, A80. doi:10.1051/0004-6361/201118672
- [23] McConnell, D., Hale, C. L., Lenc, E., et al. 2020, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 37, e048. doi:10.1017/pasa.2020.41
- [24] Taylor, A. R., Stil, J. M., & Sunstrum, C. 2009, *The Astrophysical Journal*, 702, 1230
- [25] Heald, G., Mao, S., Vacca, V., et al. 2020, *Galaxies*, 8, 53. doi:10.3390/galaxies8030053
- [26] Akahori, T., Kumazaki, K., Takahashi, K., et al. 2014, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66, 65. doi:10.1093/pasj/psu033
- [27] Akahori, T., Ideguchi, S., Aoki, T., et al. 2018, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, 115. doi:10.1093/pasj/psy124
- [28] Sun, X. H., Rudnick, L., Akahori, T., et al. 2015, *The Astronomical Journal*, 149, 60. doi:10.1088/0004-6256/149/2/60
- [29] Akahori, T., Ryu, D., Kim, J., et al. 2013, *The Astrophysical Journal*, 767, 150. doi:10.1088/0004-637X/767/2/150
- [30] Ideguchi, S., Tashiro, Y., Akahori, T., et al. 2014, *The Astrophysical Journal*, 792, 51. doi:10.1088/0004-637X/792/1/51
- [31] Porayko, N. K., Noutsos, A., Tiburzi, C., et al. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483, 4100. doi:10.1093/mnras/sty3324
- [32] Mannucci, A. J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., et al. 1998, *Radio Science*, 33, 565. doi:10.1029/97RS02707
- [33] Orús, R., Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., et al. 2005, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, 1598. doi:10.1016/j.jastp.2005.07.017
- [34] Ndiritu, S. W., Scaife, A. M. M., Tabb, D. L., et al. 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502, 5839. doi:10.1093/mnras/stab379
- [35] Pratley, L. & Johnston-Hollitt, M. 2020, *The Astrophysical Journal*, 894, 38. doi:10.3847/1538-4357/ab6e64
- [36] Sridhar, S. S., Heald, G., & van der Hulst, J. M. 2018, *Astronomy and Computing*, 25, 205. doi:10.1016/j.ascom.2018.10.002
- [37] Miyashita, Y., Ideguchi, S., & Takahashi, K. 2016, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, 44. doi:10.1093/pasj/psw039
- [38] Ideguchi, S., Miyashita, Y., & Heald, G. 2018, *Galaxies*, 6, 140. doi:10.3390/galaxies6040140
- [39] Koopmans, L., Pritchard, J., Mellema, G., et al. 2015, *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*, 1
- [40] Furlanetto, S. R., Oh, S. P., & Briggs, F. H. 2006, *Physics Reports*, 433, 181. doi:10.1016/j.physrep.2006.08.002
- [41] Jelić, V., Zaroubi, S., Labropoulos, P., et al. 2008, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 389, 1319. doi:10.1111/j.1365-2966.2008.13634.x
- [42] Liu, A., Parsons, A. R., & Trott, C. M. 2014, *Phys. Rev. D*, 90, 023018. doi:10.1103/PhysRevD.90.023018
- [43] Morales, M. F., Beardsley, A., Pober, J., et al. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483, 2207. doi:10.1093/mnras/sty2844
- [44] Tingay, S. J., Goeke, R., Bowman, J. D., et al. 2013, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 30, e007. doi:10.1017/pasa.2012.007

- [45] Wayth, R. B., Tingay, S. J., Trott, C. M., et al. 2018, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 35, e033. doi:10.1017/pasa.2018.37
- [46] van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., et al. 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 556, A2. doi:10.1051/0004-6361/201220873
- [47] SKA1 ERROR BUDGETS: SKA-SCI-ERB-001, (2016-01-29)
- [48] Braun, R. 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 551, A91. doi:10.1051/0004-6361/201220257
- [49] Mitchell, D. A., Greenhill, L. J., Wayth, R. B., et al. 2008, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2, 707. doi:10.1109/JSTSP.2008.2005327
- [50] Barry, N., Beardsley, A. P., Byrne, R., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 36, e026. doi:10.1017/pasa.2019.21
- [51] Kazemi, S., Yatawatta, S., Zaroubi, S., et al. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414, 1656. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.18506.x
- [52] Patil, A. H., Yatawatta, S., Zaroubi, S., et al. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463, 4317. doi:10.1093/mnras/stw2277
- [53] Hurley-Walker, N., Callingham, J. R., Hancock, P. J., et al. 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464, 1146. doi:10.1093/mnras/stw2337
- [54] Trott, C. M. & Wayth, R. B. 2016, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 33, e019. doi:10.1017/pasa.2016.18
- [55] Mort, B., Dulwich, F., Razavi-Ghods, N., et al. 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465, 3680. doi:10.1093/mnras/stw2814
- [56] Spreeuw, H., van Werkhoven, B., Yatawatta, S., et al. 2020, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 527, 747
- [57] Sokolowski, M., Colegate, T., Sutinjo, A. T., et al. 2017, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 34, e062. doi:10.1017/pasa.2017.54
- [58] Offringa, A. R., de Bruyn, A. G., Biehl, M., et al. 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405, 155. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.16471.x
- [59] Wilensky, M. J., Morales, M. F., Hazelton, B. J., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131, 114507. doi:10.1088/1538-3873/ab3cad
- [60] Paciga, G., Chang, T.-C., Gupta, Y., et al. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413, 1174. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.18208.x
- [61] DeBoer, D. R., Parsons, A. R., Aguirre, J. E., et al. 2017, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129, 045001. doi:10.1088/1538-3873/129/974/045001
- [62] McQuinn, M., Zahn, O., Zaldarriaga, M., et al. 2006, *The Astrophysical Journal*, 653, 815. doi:10.1086/505167
- [63] Yoshiura, S., Pindor, B., Line, J. L. B., et al. 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 4775. doi:10.1093/mnras/stab1560
- [64] Offringa, A. R., McKinley, B., Hurley-Walker, N., et al. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444, 606. doi:10.1093/mnras/stu1368
- [65] Offringa, A. R., Wayth, R. B., Hurley-Walker, N., et al. 2015, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 32, e008. doi:10.1017/pasa.2015.7
- [66] Chapman, E., Abdalla, F. B., Harker, G., et al. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423, 2518. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.21065.x

- [67] Chapman, E., Abdalla, F. B., Bobin, J., et al. 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429, 165. doi:10.1093/mnras/sts333
- [68] Mertens, F. G., Ghosh, A., & Koopmans, L. V. E. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478, 3640. doi:10.1093/mnras/sty1207
- [69] Mertens, F. G., Mevius, M., Koopmans, L. V. E., et al. 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493, 1662. doi:10.1093/mnras/staa327
- [70] Flygare, J., Billade, B., Dahlgren, M., et al. “Beam pattern measurement on offset Gregorian reflector mounted with a wideband room temperature receiver for the Square Kilometre Array” in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag. USNC/URSI Nat. Radio Sci. Meet.*, 2018
- [71] Pellegrini, A., Flygare, J., Theron, I. P., et al., 2021, “MID-Radio Telescope, Single Pixel Feed Packages for the Square Kilometer Array: An Overview”, *IEEE Journal of Microwaves*, 1, 428-437, doi:10.1109/JMW.2020.3034029.
- [72] R. Lehmensiek. “A design methodology of the wideband orthogonal mode transducer for the SKA Band 2 feed” in *Proc. 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, Switzerland, 2016
- [73] Schlee, J., Wadefalk, N., Nilsson, P. Å., et al., 2016, “10 K room temperature LNA for SKA band 1”, 2016 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 1-4, doi:10.1109/MWSYM.2016.7540344
- [74] Schlee, J., Moschetti, G., Wadefalk, N., et al., 2017, “Cryogenic LNAs for SKA band 2 to 5”, 2017 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 164-167, doi:10.1109/MWSYM.2017.8058948
- [75] Swart et al., 2019, “SKA1-Mid Telescope Design”, 2019 SKA Shanghai Meeting, Shanghai, Nov. 25-28, 2019.
- [76] Franzen R., 2017, “Dish Consortium Status in SKA1 Preconstruction”, SKA Engineering Meeting, Rotterdam, June 11-16, 2017.
- [77] Acero, F., Acquaviva, J.-T., Adam, R., et al. “French SKA White Book - The French Community towards the Square Kilometre Array”
https://ska-france.oca.eu/images/SKA-France-Media/FWB_051017.pdf
- [78] SPF Band 345 Cryogenic Functional Design Document:
317-030000-006 (2019-02-28), http://ska-sdp.org/sites/default/files/attachments/317-030000-006_reva_spfb345_cryogenicfunctiondesign.pdf
- [79] Bij de Vaate, J. G., de Villiers, D. I. L., Davidson, D. B., et al. 2021, *Experimental Astronomy*, 51, 1. doi:10.1007/s10686-020-09682-9
- [80] 2016 SKA Engineering Meeting 講演スライド:
<https://indico.skatelescope.org/event/402/page/9>
- [81] T. Kawaguchi, H. Ikeuchi, H. Kayano, Y. Sawahara, N. Shiokawa, 2017, “High-sensitivity HTS multi-channel receiver front-end for 900 MHz band mobile base station”, 449-452
- [82] 加屋野博幸, 福家浩之, 橋本龍典, 2006, “地上デジタル放送中継局用 超電導フィルタ”, *東芝レビュー*, Vol 61, No 4, 64-67
- [83] Tokumaru, M., Kojima, M., Fujiki, K., et al. 2011, *Radio Science*, 46, RS0F02. doi:10.1029/2011RS004694
- [84] Iwai, K., Kubo, Y., Ishibashi, H., et al. 2017, *Earth, Planets, and Space*, 69, 95. doi:10.1186/s40623-017-0681-8
- [85] Misawa, H., Kudo, R., Tsuchiya, F., et al., “Development of a primary feed system for the parabolic rectangular reflector antenna dedicated for planetary radio emission”, in *Proc. 3rd Communications Research Laboratory Technology Development Center Symposium*, 57-59, 2003
- [86] Tsuchiya, F., Misawa, H., Imai, K., et al. 2010, *Advances in Geosciences, Volume 19: Planetary Science (SE)*, 19, 601. doi:10.1142/9789812838162_0045
- [87] Tsuchiya, F., Misawa, H., Imai, K., et al. 2011, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 116, A09202. doi:10.1029/2010JA016303

- [88] Mikami, R., Asano, K., Tanaka, S. J., et al. 2016, *The Astrophysical Journal*, 832, 212. doi:10.3847/0004-637X/832/2/212
- [89] Takefuji, K., Terasawa, T., Kondo, T., et al. 2016, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128, 084502. doi:10.1088/1538-3873/128/966/084502
- [90] Iwai, K., Tsuchiya, F., Morioka, A., et al. 2012, *Solar Physics*, 277, 447. doi:10.1007/s11207-011-9919-y
- [91] Iwai, K., Misawa, H., Tsuchiya, F., et al. 2012, *Hinode-3: The 3rd Hinode Science Meeting*, 454, 249
- [92] Iwai, K., Miyoshi, Y., Masuda, S., et al. 2012, *The Astrophysical Journal*, 744, 167. doi:10.1088/0004-637X/744/2/167
- [93] Iwai, K., Masuda, S., Miyoshi, Y., et al. 2013, *The Astrophysical Journal Letters*, 768, L2. doi:10.1088/2041-8205/768/1/L2
- [94] Katoh, Y., Iwai, K., Nishimura, Y., et al. 2014, *The Astrophysical Journal*, 787, 45. doi:10.1088/0004-637X/787/1/45
- [95] Iwai, K., Miyoshi, Y., Masuda, S., et al. 2014, *The Astrophysical Journal*, 789, 4. doi:10.1088/0004-637X/789/1/4
- [96] Kaneda, K., Misawa, H., Iwai, K., et al. 2015, *The Astrophysical Journal Letters*, 808, L45. doi:10.1088/2041-8205/808/2/L45
- [97] Kaneda, K., Misawa, H., Iwai, K., et al. 2017, *The Astrophysical Journal*, 842, 45. doi:10.3847/1538-4357/aa74c1
- [98] Kaneda, K., Misawa, H., Iwai, K., et al. 2018, *The Astrophysical Journal Letters*, 855, L29. doi:10.3847/2041-8213/aab2a5
- [99] Tsuchiya, F., Misawa, H., Obara, T., et al. 2017, *Planetary Radio Emissions VIII*, 445. doi:10.1553/PRE8s445
- [100] 林拓磨, 關谷尚人, 大野剛, “深宇宙探査用新型アンテナのための超伝導フィルタの開発”, 超伝導エレクトロニクス研究会, SCE2020-1 (2020-09), 2020.
- [101] 關谷尚人, 林拓磨, 古瀬垣貴彦, 中島拓, “超伝導フィルタによる多輝線同時観測受信機 IF 系の小型化の検討”, 日本天文学会春季年会, V124B, 2019.
- [102] Unno, T. & Sekiya, N. 2018, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28, 2797980. doi:10.1109/TASC.2018.2797980
- [103] T. Kawaguchi, N. Shiokawa, K. Nakayama, M. Yamazaki, H. Kayano, 2011, “Narrowband superconducting receiving filter for 9GHz-band weather radar”, the 41st European Microwave Conference, 744-747, 2011
- [104] 河口民雄, 塩川教次, 中山浩平, 山崎六月, 池内浩章, 加屋野博幸, 2014, “電波天文向けデュアルバンド超伝導フィルタ”, 電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報, Vol 114, No. 11, MW2014-2, 7-10
- [105] T. Kawaguchi, H. Kayano, K. Tsubosaki, H. Kamide, T. Asakura, 2019, “HTS Quad-band High-sensitivity Receiver for a 4.5-m Radio Telescope”, the 49th European Microwave Conference (EuMC), 248-251
- [106] T. Kawaguchi, K. Tsubosaki, H. Kamide, T. Asakura, 2019, “HTS L-S band High-sensitivity Receiver for a 20-m Cassegrain Radio Telescope”, 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 1360-1362
- [107] 河口民雄, 坪崎和広, 上出弘隆, 朝倉太郎, 2020, “不要干渉波を抑圧できる電波望遠鏡向け小型マルチバンド HTS 受信機”, 東芝レビュー, Vol 75, No. 3, 43-46
- [108] SPF B345 Preliminary Design Document, SKA-TEL-DSH-0000118
- [109] <https://events.mpifr-bonn.mpg.de/indico/event/154/session/0/contribution/3/material/slides/0.pdf>
- [110] https://www.chalmers.se/en/researchinfrastructure/oso/Documents/Activity%20reports/OSO_ActivityReport_2019.pdf
- [111] Kimihiro Kimura, Private comm.
- [112] Hasegawa, Y., Maezawa, H., & Ogawa, H. 2021, *Journal of Infrared*, 42, 1. doi:10.1007/s10762-020-00752-9
- [113] SKA Organisation Operations Planning Group, JIV-ERIC Institute 2020, “D10.2 Operational Model for inclusion of SKA in Global VLBI”, WP10: VLBI with the SKA, Jumping JIVE Project ID: 730884

- [114] SKA Organisation Operations Planning Group, JIV-ERIC Institute 2019, “D10.3 Portfolio of SKA-VLBI Science Cases”, WP10: VLBI with the SKA, Jumping JIVE Project ID: 730884
- [115] SKA Organisation Operations Planning Group, JIV-ERIC Institute 2018, “D10.1 Details on VLBI Interfaces to SKA Consortia”, WP10: VLBI with the SKA, Jumping JIVE Project ID: 730884
- [116] Lacy, M., Baum, S. A., Chandler, C. J., et al. 2020, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 132, 035001. doi:10.1088/1538-3873/ab63eb
- [117] Fujisawa, K., Niinuma, K., Akimoto, M., et al. “On-the-Fly Interferometer Experiment with the Yamaguchi Interferometer” in Proc.of the 18th NICT TDC Symposium., Kashima, 2020 Oct.

製作 日本 SKA コンソーシアム

2022年3月 第2版出版