

# SKA エンジニアリングレポート



日本 Square Kilometre Array コンソーシアム

技術検討班

2017

## 目次

1	はじめに	4
1.1	SKA 計画の概要	4
1.2	日本の立場と現状	6
1.3	本誌について	7
2	Low Frequency Aperture Array (LFAA), SKA-LOW	8
2.1	LFAA の概要	8
2.1.1	LFAA/SKA-LOW	8
2.1.2	SKA-LOW の目的と科学要求	9
2.1.3	LFAA コンソーシアム	9
2.2	LFAA の設計	10
2.2.1	アンテナ・受信機	10
2.2.2	アンテナステーション	12
2.2.3	信号伝送・信号処理	12
2.2.4	電力	12
2.3	LFAA の課題	14
2.3.1	要求感度の未達成	14
2.3.2	SKA1 LFAA の費用の見積もり	15
2.3.3	SKA2 へのスケーリング	15
2.3.4	LFAA に相当する既存の電波望遠鏡	16
2.3.5	日本における LFAA 技術開発に向けて	18
3	Mid Frequency Aperture Array (MFAA)	19
3.1	MFAA の概要	20
3.1.1	SKA2 MFAA	20
3.1.2	MFAA の目的と技術目標	20
3.1.3	MFAA コンソーシアム	21
3.2	MFAA の設計	21
4	Dish (DSH), SKA-MID	23
4.1	概要	23
4.2	設計	24
4.3	課題	25

5	Wide Band Single Pixel Feed (WBSPF)	28
5.1	フィードアンテナ概論 . . . . .	28
5.2	SKA における広帯域フィード . . . . .	32
5.3	他機関の広帯域アンテナの開発 . . . . .	33
5.4	NICT 時空標準研究室 (鹿島) における広帯域アンテナの開発 . . . . .	34
5.5	国内の開発体制と SKA . . . . .	35
6	Phased Array Feed (PAF)	36
6.1	概念 . . . . .	36
6.2	現状の設計・開発状況 . . . . .	38
6.3	PAF 技術開発における課題と日本の貢献 . . . . .	40
7	Signal and Data Transport (SaDT)	43
7.1	SaDT 概要 . . . . .	43
7.2	Digital Data Backhaul (DDBH) . . . . .	43
7.3	SAT . . . . .	44
7.4	SaDT の技術課題 . . . . .	45
8	Central Signal Processor (CSP)	47
8.1	CSP 概要 . . . . .	47
8.2	CSP コンソーシアム . . . . .	47
8.3	CSP の基本機能 . . . . .	47
8.4	開発状況 . . . . .	48
8.5	CSP の技術課題 . . . . .	48
9	Science Data Processor (SDP)	51
9.1	SDP の概要 . . . . .	51
9.2	SDP の設計 . . . . .	52
9.3	SDP の課題 . . . . .	54
9.3.1	現在の設計における不安要素 . . . . .	54
9.3.2	日本の可能な貢献 . . . . .	56
A	SKA1 Level 0 Science Requirements	57
B	電波天文観測の基礎	59
B.1	電波望遠鏡の感度 . . . . .	59
B.2	集光面積と視野のトレードオフ関係 . . . . .	59
B.3	サーベイスピード . . . . .	60

# 1 はじめに

執筆: 赤堀卓也 (鹿児島大学), 青木貴弘 (山口大学)

## 1.1 SKA 計画の概要

**SKA 計画** SKA 計画とは、2020 年頃に南アフリカとオーストラリアに国際電波望遠鏡を建設する計画のことである。日米欧らが推進するミリ波・サブミリ波電波望遠鏡 ALMA では探ることのできない、センチ波・メートル波の電波を観測する。本誌で用いる略称を表 1.1 にまとめる。

表 1.1 本誌で扱う略称一覧<sup>†</sup>

略称	正式名称	解説
AIV	Assembly, Installation, and Verification	組立・導入・検査
CDR	Critical Design Review	詳細設計審査
CSP	Central Signal Processor	相関処理およびビームフォーミングを行う装置
DSH	DISH	パラボラアンテナ
INFRA	Infrastructure	送電などのインフラ
LFAA	Low Frequency Aperture Array	低周波アンテナアレイ
MFAA	Mid Frequency Aperture Array	中周波アンテナアレイ
PAF	Phased Array Feed	フェーズドアレイによる複数素子のフィード
PDR	Preliminary Design Review	基本設計審査
RBS	Re-Baselining Submission	計画・目標の再設定の提案
SaDT	Signal and Data Transport	信号・データ伝送
SDP	Science Data Processor	データ処理を行うスーパーコンピューター
SKA	Square Kilometre Array	本プロジェクト名称
SKA1	SKA Phase 1	SKA 計画の第 1 期 (2018 年から 2023 年)
SKA2	SKA Phase 2	SKA 計画の第 2 期 (2023 年以降)
SPF	Single Pixel Feed	単一素子の通常のフィード
BDv1	SKA1 System Baseline Design	基本設計文書第 1 版 (2013 年公開)
BDv2	SKA1 System Baseline Design	基本設計文書第 2 版 (2015 年公開)
TM	Telescope Manager	望遠鏡管理
WBSPF	Wide Band Single Pixel Feed	単一素子の広帯域フィード
WPC	Work Package Consortium (Consortia)	技術開発を行うコンソーシアム

<sup>†</sup>SKA 機構のウェブページも参照：<https://www.skatelescope.org/acronyms/>

**科学的意義と科学要求** センチ波・メートル波は水素などの特定物質の輝線・吸収線とシンクロトロン放射などの連続波・偏波を観測することができる。SKA 計画ではその利点を活かしたさまざまな科学目標が挙げられている。世界の研究者は科学目標の達成に必要な性能を議論し、観測装

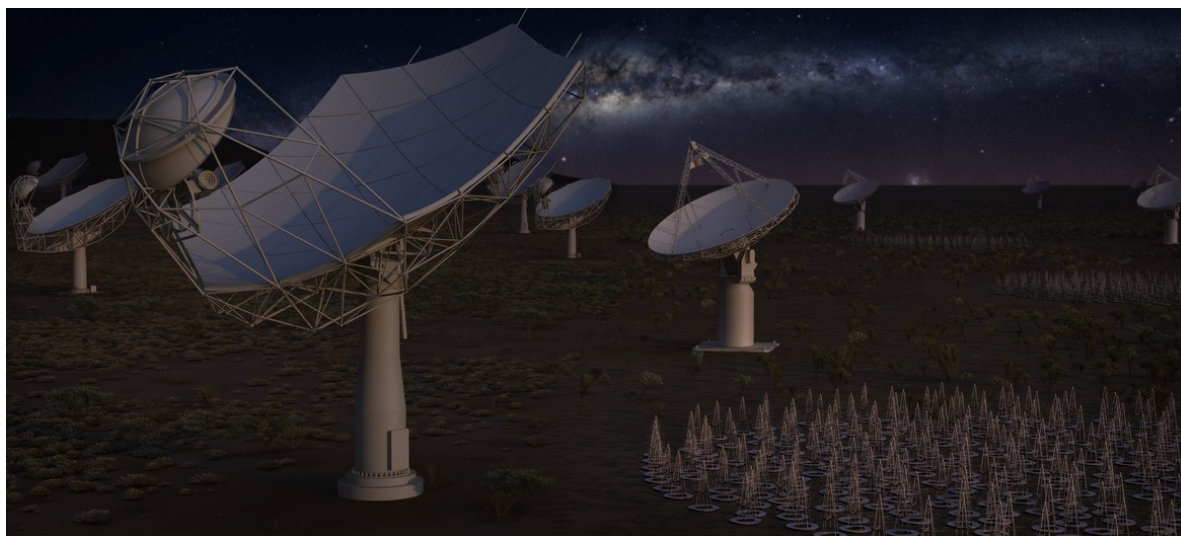


図 1.1 (図) 天の川を探る SKA の想像図と基地局の想像図。SKA のホームページより。

置を数 100 の基地局に分けて数 1,000 km の範囲に分布させる電波干渉計が必要であると結論付けた。これはオーストラリア大陸全部の大きさに相当する人類史上最大の望遠鏡である。それぞれの科学目標にはそれぞれの挑戦的な技術課題もある。メートル波の観測では宇宙の最遠方・暗黒時代の探査を目指す、電波周波数障害や大気の影響を限りなく取り除いた超高感度観測が求められる。センチ波の観測ではパルサーのモニタリングから重力理論の検証を目指す、高い時間精度とリアルタイムでの高速なデータ処理が求められる。突発的現象の探査や VLBI 観測でも同種の要求がある。銀河の研究では赤方偏移した水素輝線の広帯域観測のためのビッグデータの処理、磁場の研究ではかつてないほど精密な偏波精度が求められる。

**計画の概要** 図 1.1 には SKA 望遠鏡群の想像図を示す。計画は、立地条件の最も良い南アフリカとその周辺国、そしてオーストラリアに分散させて建設することに決め、工期を一期と二期とに分けた。一期 (Phase1) は最終構成の 10% を 2018 年から建設し 2023 年から運用、二期 (Phase2) を最終構成の 90% を 2023 年から建設し 2028 年頃から運用することに決めた。オーストラリアでは第一期に 256 台の長波長開口アンテナで構成される基地局を 512 局、合計で約 13 万台の長波長開口アンテナを設置する (SKA1-LOW)。第二期では基地局を増やし、約 50 万台の長波長開口アンテナを設置する (SKA2-LOW)。南アフリカとその周辺国では第一期に 190 台の 15m SKA パラボナアンテナと 64 台の MeerKAT パラボナアンテナを用いる (SKA1-MID)。これらは SPF を搭載する。第二期では SKA パラボナアンテナを 2,500 台に増やし最大 3,000 km にまで分布させる (SKA2-MID)。これらは WBSPPF あるいは PAF を搭載する。また 250 の中間波長高密度開口アンテナ局を設置し広視野観測をする (SKA2-MFAA)。

**Work Package Consortia (WPC)** SKA での技術開発は Work Package Consortia (WPC) という国際共同体を組織して進められており、表 1.2 にその一覧を示す。SKA に技術貢献するには、提案

する技術要素に応じた WPC に参加することが必要となる。各 WPC はその名が表すような技術開発を担当しているが、本誌でその詳細をまとめる。

表 1.2 WPC 一覧

AIV	Assembly, Installation, and Verification
CSP	Central Signal Processor
DSH	DISH
INFRA	Infrastructure
LFAA	Low Frequency Aperture Array
MFAA	Mid Frequency Aperture Array
PAF	Phased Array Feed
SaDT	Signal and Data Transport
SDP	Science Data Processor
TM	Telescope Manager
WBSPF	Wide Band Single Pixel Feed

## 1.2 日本の立場と現状

**国際協力と日本の現状** このような規模の計画は、一国で達成することは困難である。そこで世界各国が共に協力することで、その達成を目指すことにした。現在、主要メンバーとしてイギリス・オーストラリア・南アフリカがリード国となりさらにニュージーランド・イタリア・オランダ・中国・カナダ・インド・ノルウェーの計 10 カ国が、各国政府の予算支援の下で SKA 計画を推進している。我が国はまだ大型予算を割いて SKA 計画に参加してないが、関心を持つ国として、研究者個人レベルでの協力を進めてきた。我が国がこのような世界規模の計画に金銭的・技術的に参画することは、イニシアチブを確保して研究を有利に進めるだけでなく、計画を通じた科学・技術の発展や人材の育成に大きな意義をもつ。世界中の研究者が英知を集結して SKA 計画を進めている中で、科学・技術の先進国として、日本が世界から大きな期待を持たれていることも事実である。

**日本 SKA コンソーシアム** 我が国では 2008 年に日本 SKA コンソーシアム (SKA-JP) が結成され、研究者レベルでの活動が行われている。コンソーシアムには現在 200 名近い科学者・技術者が参加している。活動の中心は科学検討班 (Science Working Group) と技術検討班 (Engineering Working Group) が担っている。運営はコンソーシアム代表 1 名と副代表 2 名、資金獲得ならびに広報が担う。産業界とも連携をするため、産業フォーラム (Industry Forum) も組織されている。

### 1.3 本誌について

**編纂の経緯** 前述の通り、SKA に技術寄与するにはその技術に応じた WPC に参加し、研究開発状況を報告したり場合によっては技術情報を提供しなければならない。そこでまず WPC の組織情報や担当技術などについて把握するため、各 WPC で公開している技術情報と SKA の設計について本誌にまとめることとした。以降では各 WPC ごとに節を設け、それぞれにおいて WPC の組織や概要を述べた後、その担当技術の詳細についてまとめている。また国内外の研究開発状況を簡単に調査し、技術寄与の下地についても報告した。本誌は我々 SKA-JP 自身が WPC に参加するための基礎資料であるとともに、国内の学术界・産業界の研究開発者による SKA の理解を助け、我が国の SKA 参入を狙うものである。これをきっかけとして、我が国における理工学研究及び産業振興がより一層発展することを望む。

**本誌の範囲** 本誌は SKA 機構に組織されている WPC の枠組みに従って、LFAA (§2)、MFAA (§3)、DISH (§4)、WBSPP (§5)、PAF (§6)、SaDT (§7)、CSP (§8)、SDP (§9) と分けて解説している。前述のように、この他にも AIV や INFRA, TM といった WPC が組織されているが、2016 年現在は基本設計の段階であり AIV や TM といった WPC に日本が積極的に参加することは考えづらく、また INFRA については建設地の地元機関や企業が担っているため、本誌ではまとめていない。

**各節の内容** 本誌は SKA 機構によって公開されている文書にもとづいて執筆されている。参照した文書は巻末に列挙しており、主に SKA 機構が 2013 年代に出版した概念設計文書および基本設計文書 *Baseline Design Version 1.0* [4]、そして 2015 年 10 月に出版し、2016 年 2 月に改訂された基本設計文書 *Baseline Design Version 2.0* [5]、および各 WPC によって編纂された技術文書や国際会議における講演スライドを参照しまとめている。また現在指摘されている技術的課題、および将来 SKA2 へフェーズアップする際にあがるだろう技術的課題についてまとめ、それらの解決につながる関連技術の研究開発状況について、調査できている範囲で紹介する。

## 2 Low Frequency Aperture Array (LFAA), SKA-LOW

執筆: 青木貴弘 (山口大学)

本節では Low Frequency Aperture Array (LFAA)、つまり図 2.1 に示す、オーストラリアに建設される電波望遠鏡 SKA-LOW の構成技術について報告する。ここでいう LFAA とは、およそ 300 MHz 以下の低周波アンテナアレイを指す。初めに第 2.1 節において、LFAA/SKA-LOW とその技術検討を行っている LFAA コンソーシアムについてまとめる。次に第 2.2 節で 2016 年現在の設計について詳述し、第 2.3 節において SKA 機構および我々 SKA-JP が考える技術上の困難や課題について報告する。LFAA における最も大きな課題は、現状の設計では科学的に要求される感度を満たせていないことであろう。本節で示すいくつかの課題を解決できるような技術を提案することができれば、電波天文のみならず広い産業応用が期待出来る。

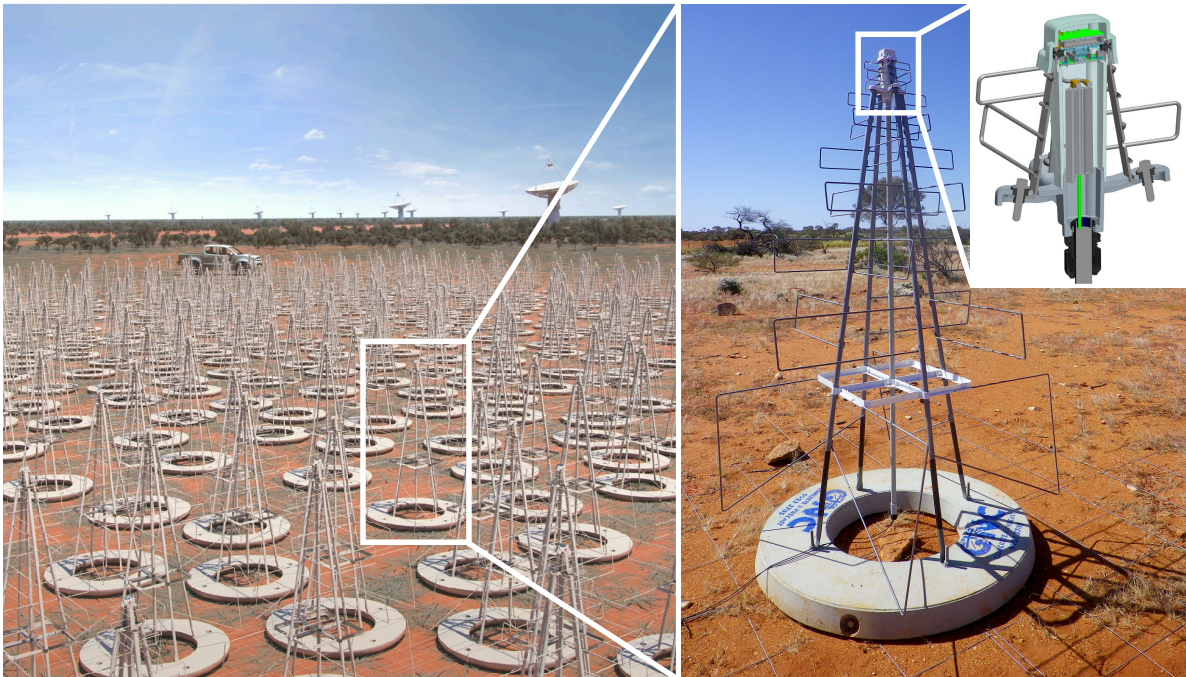


図 2.1 左: SKA-LOW 望遠鏡のイメージ図。遠くに描かれたパラボラアンテナは同じ地区に建設されている ASKAP 望遠鏡。右: 試作されたアンテナ。頭頂部に低雑音増幅器が設置される。

### 2.1 LFAA の概要

#### 2.1.1 LFAA/SKA-LOW

SKA における 2 大計画のひとつとして、図 2.1 のような LFAA によって構成される電波望遠鏡が、オーストラリア西部の砂漠に建設される。この望遠鏡を SKA-LOW とよび、そのシステ



ム設計は SKA 機構の LFAA コンソーシアムが担い、また建設地における電力等インフラ整備は INFRA-AUS というコンソーシアムが担っている。本節ではそれらコンソーシアムによる各種報告書に基づき、LFAA/SKA-LOW システムについて述べる。

### 2.1.2 SKA-LOW の目的と科学要求

LFAA で構成される SKA-LOW は、宇宙再電離期 (Epoch of Reionization; EoR) と呼ばれる宇宙初期の歴史を解き明かすために建設する望遠鏡である。SKA-LOW は、その宇宙再電離が「いつ、どのように始まり、終わったか」を解明し、宇宙最初の星がどのような星だったのかという情報を与え、宇宙の歴史の最初期を見渡すことができる望遠鏡となるよう設計される<sup>\*1</sup>。その他にも、パルサーという中性子だけでできた星や、星の爆発のような突発現象など様々な研究対象があり、それらの科学要求を可能な限り満足できるような設計が望まれている。具体的な科学目標とその要求については付録 A に列挙されている。

### 2.1.3 LFAA コンソーシアム

SKA 機構における LFAA コンソーシアムは、表 2.1 に示す通り主に学術機関で構成され、ASTRON が代表を務めている。各機関の担当している要素技術が何か、といった情報は明確には見つけられなかったが、INAF、KLAASA、Oxford は信号処理装置の設計を行っているようである。

表 2.1 LFAA コンソーシアム参加機関 (2015 年 10 月現在)<sup>a</sup>

参加機関	国
ASTRON (Netherlands Institute for Radio Astronomy)	オランダ
ICRAR (International Centre for Radio Astronomy Research)	オーストラリア
INAF (National Institute for Astrophysics)	イタリア
KLAASA (Key Lab of Aperture Array and Space Application) <sup>b</sup>	中国
STFC (Science and Technology Facilities Council)	イギリス
University of Cambridge	イギリス
University of Oxford	イギリス
Nice Observatory	フランス

<sup>a</sup> 2015 SKA Engineering Meeting における講演スライド [6] に基づく。

<sup>b</sup> China Electronics Technology Group Corporation No.38 Research Institute (CETC38)

\*1 現代宇宙論によれば、宇宙は「ビッグバン」に始まり、高温高密度のプラズマ状態から中性水素がで始める「宇宙の晴れ上がり」という時期を経て、宇宙全体が中性水素で満たされる「暗黒時代」に入る。その後、初代天体が形成され輝き始めると、その光が水素を電離して再びプラズマが作られ始め、その時期を「宇宙再電離期」とよぶ。その再電離はある時期に終了し、それ以降現代にいたるまで、宇宙はほぼ完全に電離された状態にある。宇宙再電離は宇宙誕生後 5 億年から 10 億年の間に起こったと考えられているが、その全容を解明できる可能性があるのは、向こう半世紀の望遠鏡計画の中では SKA-LOW のみである。

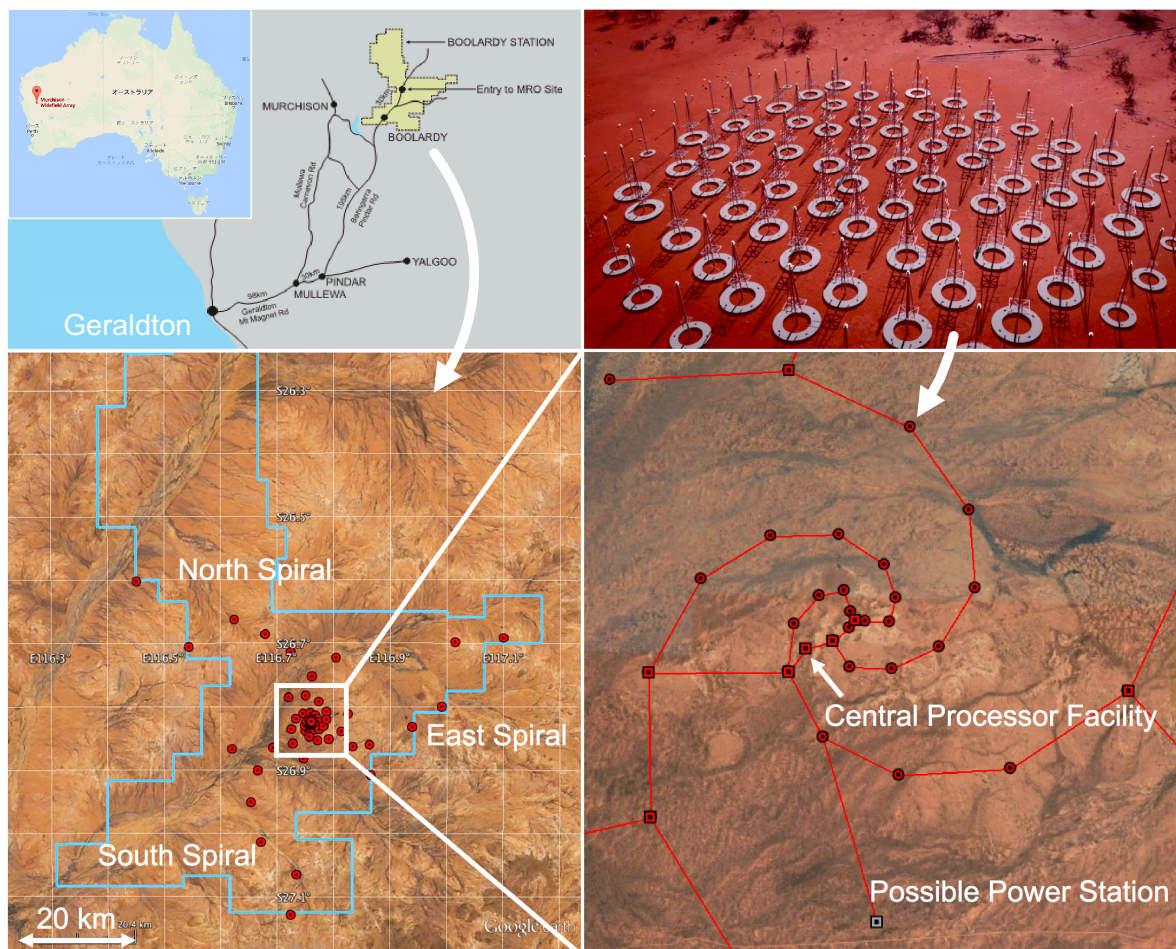


図 2.2 SKA1-LOW のアンテナの配置 [7]。256 台のアンテナ群を一つのステーション (赤点) とし、計 512 ステーション建設する。コアステーションから 3 本の腕を伸ばし、直径 80 km の範囲でらせん状にステーションを配置する。Central Processor Facility は第 8 節の CSP の拠点となる建物である。

## 2.2 LFAA の設計

2015 年現在では第 1 期の SKA-LOW 望遠鏡 (以下 SKA1-LOW) の基本設計が公開されており、図 2.2 のように建設され、その性能を表 2.2 にまとめ詳述する。

### 2.2.1 アンテナ・受信機

周波数 50 – 350 MHz、両偏波観測ができるアンテナが科学要求であり、それを満足するアンテナとして直交・対数周期ダイポールアンテナ (crossed log-periodic dipole antenna) が採用された。ただし周波数は科学要求より若干狭い 50 – 300 MHz に設定されている。アンテナの設計は 2016 年現在も進行中であり、ゲインと視野のトレードオフ検討の結果、視野を約  $20 \text{ deg}^2$  に保つよう設計

表 2.2 SKA1-LOW の概要

アンテナの種類:	直交・対数周期アンテナ
アンテナの数:	約 13 万台
アンテナステーション:	256 antennas/station, 512 stations in total
アンテナの配置:	図 2.2 の通り
観測周波数:	50 – 300 MHz (250 MHz bandwidth)
受信偏波:	直線 2 偏波
感度:	図 2.3 の通り
視野:	20 deg <sup>2</sup>
最大基線長:*	65 km
量子化ビット数:	8 bit
データレート:	10 Gbps/station**

\* 基線長とはアンテナ間の距離を意味する。

\*\* 1 つのステーションあたり 1 つのビームを作るという仮定のもとで、各ステーションが出力するデータレートは 8 bit/Sample × 500 MS/s (Nyquist rate) × 2 (dual-polarisation) × 1.25 (8b/10b encoding) = 10 Gbps となる。

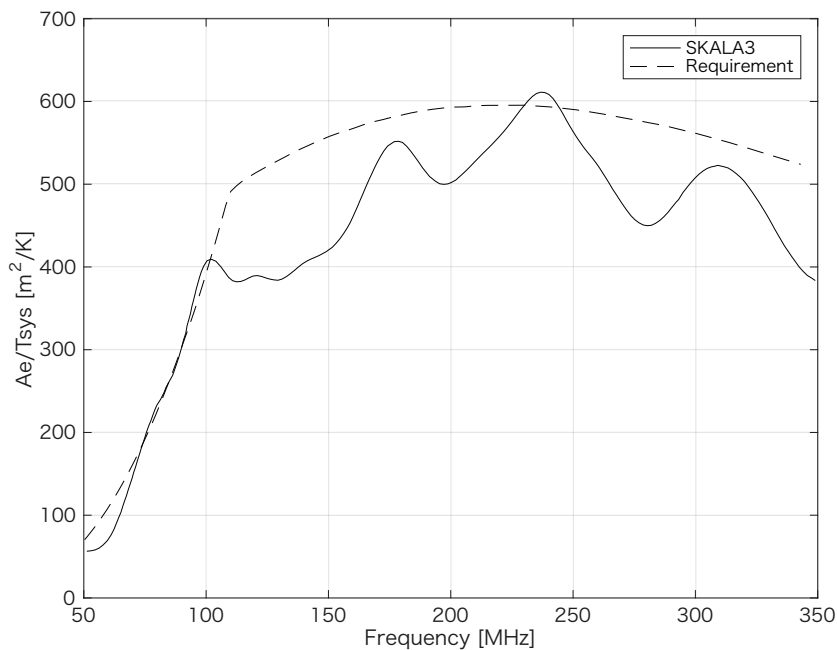


図 2.3 SKA1-LOW の感度。系列 SKALA3 は 2016 年現在のアンテナデザイン第 3 版、系列 Requirement は科学要求を表し、現状のデザインは周波数によっては科学要求の 8 割しか満たしていない。感度パラメータ  $A_e/T_{sys}$  の意味は付録 B を参照。

が進められているようである。また図 2.1 に示すようにアンテナ頭頂部に低雑音増幅器を設置し、2 偏波の RF 信号を同軸ケーブルへ出力する。

### 2.2.2 アンテナステーション

アンテナ 256 台を直径 35 m の範囲に群集させて 1 つのステーションを構成し、SKA1 では計 512 ステーション建設する。個々のアンテナから出力される RF 信号は、ステーションごとに設置されるインターフェースユニットという装置へ同軸ケーブルで伝送され、そこで E/O 変換されてアナログ信号のまま RFoF (Radio Frequency over Fibre) 伝送される。インターフェースユニットは電力分配の役割も担っている。

### 2.2.3 信号伝送・信号処理

ステーションからの出力は光ファイバーを通して図 2.2 にある Central Processor Facility という信号処理センターへ送られ、そこで A/D 変換される。デジタル化されたデータは各種キャリアレーションを経た後、1 つのステーションあたり 1 つのビームとなるようビームフォーミングされ、SKA1 では計 512 本の論理ビームが作られる (ただし校正や汎用性の観点から、1 つのステーション内で複数のビームを合成することも望まれており、基本設計の段階ではその点についても議論されているようである)。アンテナの RF 出力からステーションビーム形成までの信号の流れを図 2.4 に示す。またステーションビームのパターンはシミュレーションによって図 2.5 のように得られている。ビームフォーミングを行う処理装置として FPGA と DSP のどちらを採用するかは、2016 年現在決定されておらず設計を競い合っている最中である。

LFAA コンソーシアムによる仕事はステーションビームを合成するまでであり、その後、512 本のステーションビームを使ってさらにビームフォーミングしたり電波干渉計としての相関処理を行うが、その信号処理については第 8 節で述べる Central Signal Processor (CSP) コンソーシアムが設計を担当する。CSP で処理されたデータはさらに、第 9 で述べる Science Data Processor (SDP) というスパコンセンターへ送られ、そこで様々な処理が施された後、最終的に研究者の手に渡ることになる。CSP や SDP を収容する建物については INFRA コンソーシアムが設計を行ない、また観測データや望遠鏡コントロールなどの各種信号の伝送路設計は、第 7 節で述べる Signal and Data Transport (SaDT) コンソーシアムが行なっている。

### 2.2.4 電力

ディーゼル発電機が 240 kW×2 台、1 MW×2 台の計 4 台、およびソーラー発電機 250 kW が設置済みであり、2016 年末には 1.6 MW のメガソーラー発電所が建設される予定で、計 4.3 MW の電力供給が可能となるようである。また容量 2.5 MWh のリチウムイオンバッテリーも設置され、恐らく夜間の電力供給などに使用されるものと思われる。発電所は図 2.2 の Power Station と書かれた場所に設けられると思われる、州政府の電力会社 Horizon Power が担っている。

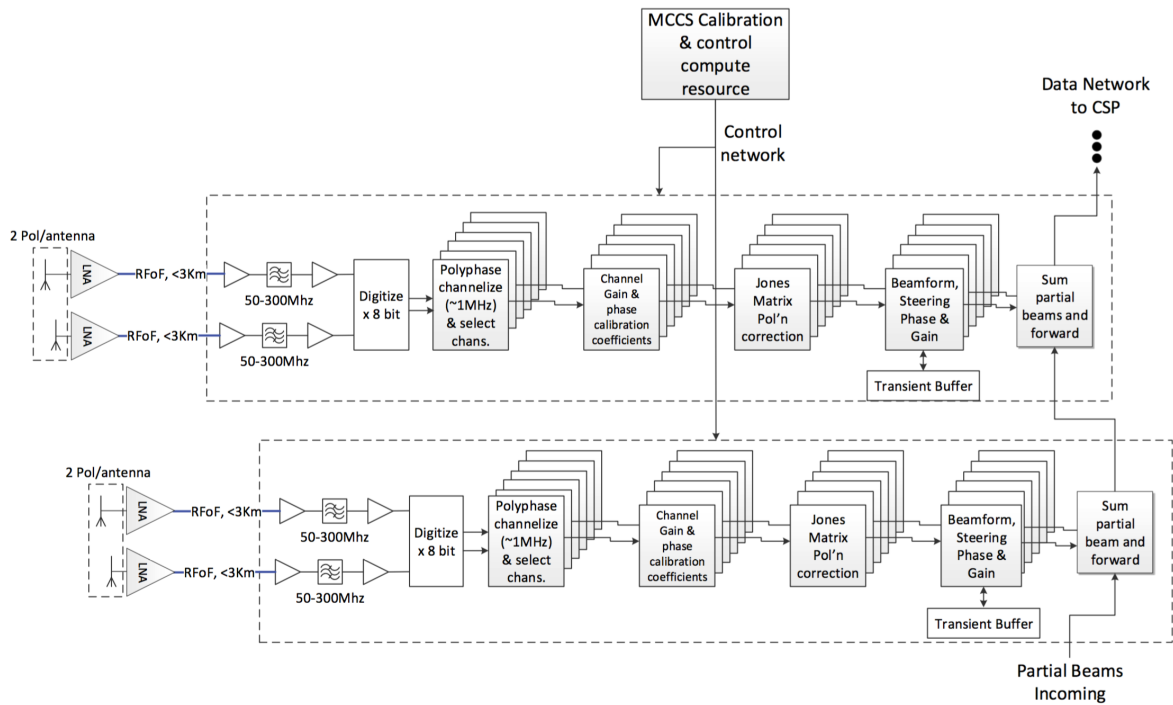


図 2.4 SKA-LOW アンテナの RF 出力からステーションビーム形成までの信号の流れ [5]。256 台のアンテナからの RF 出力はステーションごとに設置されるインターフェースユニットに集められ、そこで E/O 変換されて RFoF によって信号処理施設に伝送される。そこで A/D 変換された信号は各種信号処理を経て、1つのステーションにつき1つのデジタルビームとして合成される。こうして合成された計 512 本のステーションビームデータは、同じ施設内の別の信号処理装置 CSP へ送られ、さらにビーム合成や関連処理などが行われる。

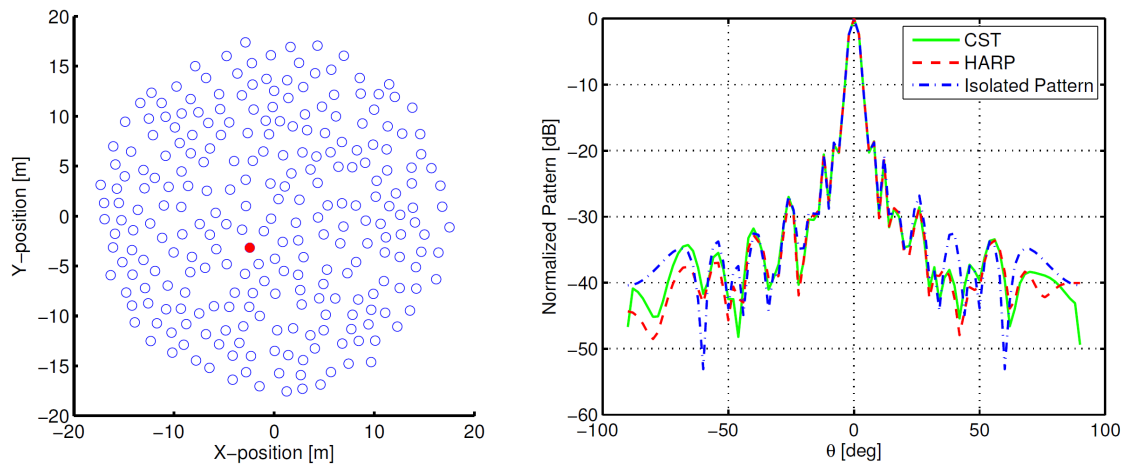


図 2.5 SKA-LOW ステーションビームパターンのシミュレーション [6]。

## 2.3 LFAA の課題

### 2.3.1 要求感度の未達成

図 2.3 に示した通り LFAA の感度は科学要求を満たしておらず、周波数によっては要求の 8 割の感度しかない。付録 B にあるように、電波望遠鏡の感度は第一義的には集光面積  $A_e$ 、システム雑音温度  $T_{\text{sys}}$  によって定まり、感度の良さは感度パラメータ  $A_e/T_{\text{sys}}$  の大きさを表される。つまり感度を上げるためには、集光面積  $A_e$  を上げ、システム雑音温度  $T_{\text{sys}}$  を下げなければならない。

それらを改善するためには、対数周期アンテナではない別のアンテナに変更する、対数周期アンテナの指向性を上げて集光面積  $A_e$  を増やす、アンテナの素子数を増やす、あるいはシステム雑音温度  $T_{\text{sys}}$  を下げる、という方法が考えられる。しかしそれらの実施には、下記のような困難やデメリットが伴う。

**別の種類のアンテナに変更する場合** 科学要求である観測帯域 50 – 300 MHz という広帯域で、対数周期アンテナに勝る高感度のアンテナがあれば、検討の余地がある。

**アンテナの指向性を上げる場合** 付録 B.2 に示すように、アンテナの指向性 (つまり利得や集光面積) と視野はトレードオフの関係にある。したがって指向性を上げると視野を狭めてしまうため、LFAA のようにアンテナを地面に固定し駆動させない場合、観測できる天体を減らし研究内容を狭めることになってしまい、デメリットは大きい。そのため LFAA のアンテナは、視野をおよそ  $20 \text{ deg}^2$  に保つようデザインされているようであり、アンテナの指向性を上げるという選択は難しい。

**アンテナの素子数を増やす場合** 素子数を増やすと必要な信号処理装置も増えるため、コストが大幅に増えてしまう。したがって素子数を増やすという選択肢は SKA1 では恐らく考慮されず、SKA2 の課題となるだろう。

**受信機雑音温度を下げる場合** システム雑音温度  $T_{\text{sys}}$  は、大気雑音や地面からのスピルオーバー雑音、受信機雑音などに分けることができ、装置の工夫で改善できるのはスピルオーバーや受信機雑音である。しかし LFAA の運用帯域 50 – 300 MHz ではそもそも天の川銀河による背景雑音レベルがとても高く、その雑音温度は数百 K に達する。銀河雑音は観測上必ず入り込んでしまい、それがシステム雑音の中で支配的である以上、受信機雑音をどんなに下げても高い効果は期待できない。

広帯域 (50 – 300 MHz) かつ広視野 (約  $20 \text{ deg}^2$ ) が求められる LFAA には、その最適解として対数周期アンテナが採用されたが、結果として科学的な要求感度を満たすに至っていない。そしてその感度不足という問題は、上述のように、アンテナのデザインを大幅に改善するか台数を増やすことでしか解決は困難だと思われる。よってアンテナ台数の増加に伴う信号処理系の大規模化を、コストを抑えつつ実現できる技術、あるいは対数周期アンテナよりも安価で、LFAA 全体として高感度を実現できるようなアンテナを設計できれば、SKA のみならず学术界・産業界の大きな発展につながるだろう。

### 2.3.2 SKA1 LFAA の費用の見積もり

2015 年時点での試算に基づく費用の分布を図 2.6 に示す。全体の費用は約 8900 万ユーロ (1 ユーロ 130 円とすれば 116 億円) であり、その約 6 割を Antenna & LNA, Receiver, Signal Processing という観測装置が占めている。ここで Receiver は LNA から AD 変換器までの信号伝送、増幅器、フィルター等アナログ受信系を表し、Signal Processing は AD 変換器を含み、帯域のチャンネル化やビームフォーミング等を行うデジタル処理系を表す。

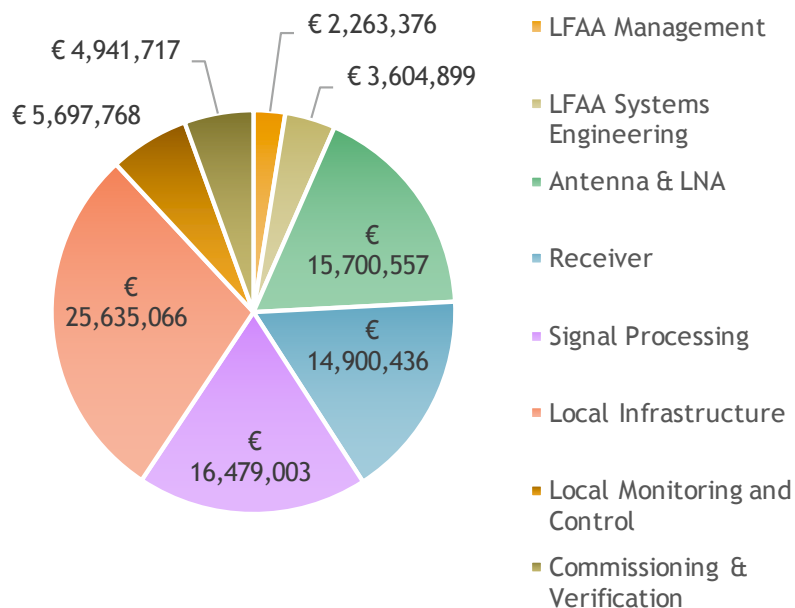


図 2.6 SKA1 LFAA の費用の分布 [6]。

### 2.3.3 SKA2 へのスケーリング

上述の設計に基づく SKA1 LFAA をテストベッドとして、将来 SKA2 LFAA として展開するにあたり、そのおおよその仕様が表 2.3 のように提案されている。ただしその表で示されている SKA1 Proposed の欄は 2013 年時点での提案仕様であり、2016 現在ではアンテナの台数が約半分に縮小されている。提案されている SKA2 LFAA では、アンテナを 300 万台以上設置し、また観測帯域を広げることを目標としている。

表 2.3 SKA2 LFAA として提案されている仕様 [8]。

Parameter	SKA2 Predicted	SKA1 Proposed	Comments
Number of antennas	3-4 million	~256,000	This is a big change between SKA1 and SKA2. A dramatic increase in sensitivity.
Types of element	1	1	The full frequency range will be covered by a single element type. This will have been demonstrated in SKA1.
Frequency – low	<50MHz	50MHz	It is conceivable that the minimum frequency will move down for SKA2
Frequency – high	TBD	650 MHz	The performance of relatively sparse antennas at the high-end frequencies will be determined with SKA1. The upper frequency of SKA2 will be based on the capabilities of all parts of SKA2, taking much reduced processing cost in Phase 2 of the SKA into account.
Element separation	1.35m ( $\lambda/2$ at 111MHz)	1.35m	The spacing of 1.35m can be adjusted if required. The SKA2 design will be scientifically justified
Station diameter	20-200m	20-100m	With this many antennas, small stations may be hard to process due to the very large number of stations formed – even just in the core. However, flexibility in station size will be retained
Polarisations	2 – linear	2 – linear	Essential to have a dual polarisation system
Number of bands	1	2	SKA2 processing will be capable of digitising and processing the full available bandwidth, both for scientific benefit and reducing implementation cost
Max. inst. Bandwidth	600MHz	335MHz & 300MHz	See above
Data rate	2.5 Pb/s ( $10^{15}$ )	$\geq 10$ Tb/s total	This is a very great change between SKA1 and SKA2 and leads to the extreme performance capability
Data flexibility	Completely flexibly assigned	Flexibly assigned within a band	Data output can be assigned to arbitrary beamlets in arbitrary directions up to the total designed data rate. Then each experiment can be optimised, or concurrent experiments run.
Sample resolution	4 or 8-bit	4 or 8-bit capability	Many experiments will operate effectively with 4-bit data, hence doubling the total bandwidth for the same data rate.

#### 2.3.4 LFAA に相当する既存の電波望遠鏡

フェーズドアレイ技術は広く学術応用、産業応用されており、既存の電波天文施設としては、例えば SKA Precursor<sup>\*2</sup>であるオーストラリアの MWA (Murchison Widefield Array) や南アフリカの HERA (Hydrogen Epoch of Reionization Array) がある (図 2.7)。また特筆すべき大規模な施設とし

<sup>\*2</sup> SKA Precursor とは、SKA の試験機として位置付けられる望遠鏡のうち、特に SKA 計画に資する望遠鏡として認められているものを指す。



てオランダ主導でヨーロッパ諸国に広く展開されている LOFAR (Low Frequency Array) がある。SKA の LFAA は、これらの望遠鏡における技術開発や科学観測の結果を踏まえながら設計されている。



図 2.7 フェーズドアレイ技術を用いた電波天文施設。左からオーストラリアの MWA、南アフリカの HERA、ヨーロッパの LOFAR Low Band Antenna。

一方で日本国内では、早稲田大学の早稲田アレイと那須アレイが電波天文施設としてフェーズドアレイ技術を用いており、それぞれ 10 GHz と 1.4 GHz を観測している (図 2.8)。早稲田アレイは口径 2.4 m のパラボラアンテナ 64 台でビームフォーミング、那須アレイは口径 20 m の球面鏡 8 台でビームフォーミングを行い、単一鏡のビームをアンテナの台数分だけ分割したマルチビーム観測を行っている。また他の科学観測施設としては、例えば京都大学がもつ大気観測施設 MU レーダーがある。MU レーダーは 475 個の直交八木アンテナからなるアクティブフェーズドアレイレーダーであり、中心周波数 46.5 MHz、帯域幅 3.5 MHz で運用されている。ただしフェーズドアレイレーダーの場合、一般的には各アンテナに設置されたアナログ移相器を個別に電気制御することでビームフォーミングする。一方で電波天文施設の場合、運用帯域幅が数百 MHz 以上と広く、また設備の柔軟性のため、アナログ移相器は使用せずに AD 変換後のデジタルデータを FPGA 上で移相することでビームフォーミングすることが多い。日本では LFAA を用いた電波天文はほとんど行われていないものの、他の科学分野や産業界では広く使われており、天文への応用も本格化させる必要があるだろう。

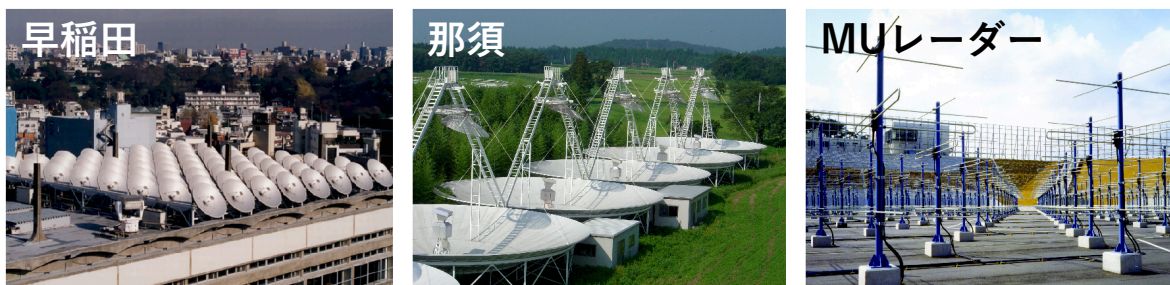


図 2.8 フェーズドアレイ技術を用いた日本の電波天文施設 (早稲田アレイ、那須アレイ) と大気観測施設 (MU レーダー)。

### 2.3.5 日本における LFAA 技術開発に向けて

フェーズドアレイ技術は、技術の進歩に応じ科学界、産業界問わず広く使用されるようになった。電波天文学界でも、世界全体を見渡すと大規模なフェーズドアレイアンテナが建設されてきており、さらには第 6 章に示すようにアレイアンテナで構成されたフィードも実用化され、新しい天文学が開拓され始めている。日本では低周波の電波天文観測は活発ではなく、LFAA に相当する天文施設はほとんどないが、そこには科学的にも技術的にも興味深い研究テーマがあり、日本においても LFAA 技術を応用した天文学を推進することが重要である。その推進には、例として下記のような方策が挙げられるだろう。

**既存の電波天文施設への人的貢献** 既に日本人が LOFAR の開発に携わっており、また MWA への学生派遣なども計画されている。今後これを加速させ、科学と技術の両面からノウハウ修得を図るべきだろう。

**既存システムの購入** 例えば LOFAR で使われているハードウェアとソフトウェアは、電波望遠鏡システムとして購入することができ、日本国内に設置することも容易とのことである。ノウハウの修得や海外との連携のためにも、既存システムの購入は様々な推進方法のうちの一つとして一考に値する。

**システムの自作** 日本国内において、近い将来に一から LFAA を自作して電波天文学をするという計画は現状ないと思われるが、それを推進することは重要であろう。

以上のようにして、日本においても LFAA を用いた電波天文を推進することで、次世代の研究者が幅広い宇宙研究に携わることができるようになり、宇宙科学の大きな発展が期待出来る。

### 3 Mid Frequency Aperture Array (MFAA)

執筆: 青木貴弘 (山口大学)

本節では Mid Frequency Aperture Array (MFAA) とよぶ、SKA2 での建設を目指している図 3.1 のような 1 GHz 帯の中周波アンテナアレイについて報告する。第 3.1 節で MFAA とその技術検討を行っている MFAA コンソーシアムについてまとめ、第 3.2 節で 2016 年現在の設計について報告する。ただしその基本的なシステム構成は第 2 節の LFAA と同様なため、本節は簡単な記述に留める。とはいえ MFAA は、第 6 節の PAF を反射鏡を使わず地面に直接置いたものであり、PAF と MFAA は技術的に重なる部分が多い。PAF は日本国内の既存の電波望遠鏡にも応用できる技術であり、PAF と MFAA の研究開発は日本の電波天文学の発展に大きく寄与するだろう。

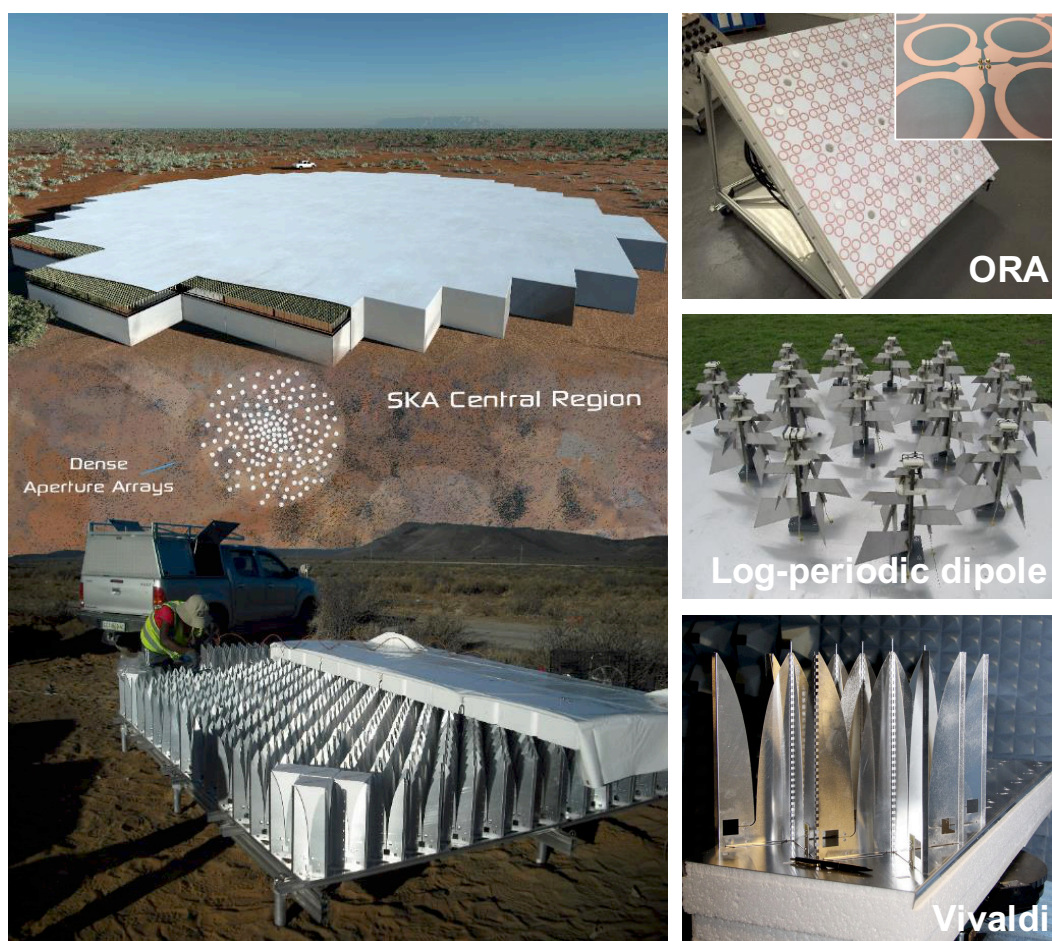


図 3.1 MFAA の構想図。1 GHz 帯の素子アンテナを地上に固定したアンテナアレイ。2016 年現在、octagonal ring array (ORA)、対数周期アンテナ、ビバルディアンテナをアンテナの候補として、調査研究している。

### 3.1 MFAA の概要

#### 3.1.1 SKA2 MFAA

MFAA は第 2 節の LFAA と同様に、図 3.1 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-AAMID<sup>\*3</sup>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。

#### 3.1.2 MFAA の目的と技術目標

MFAA の科学対象は、突発天体<sup>\*4</sup>、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、付録 B.3 に示す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:  $\Omega_{\text{FoV}}(A_e/T_{\text{sys}})^2 > 1.4 \times 10^{10} \text{ deg}^2 \text{ m}^4/\text{K}^2$

といったものである。

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、または第 6 節の 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 3.1 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 3.1 10 億ユーロで実現可能な望遠鏡の性能 [7]。

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

<sup>\*3</sup> SKA-AAMID: SKA Aperture Array Mid-frequency

<sup>\*4</sup> 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。

## 3.1.3 MFAA コンソーシアム

SKA 機構における MFAA コンソーシアムは、表 3.2 に示す通り主に学術機関で構成され、2016 年 10 月現在の代表は ASTRON の Wim van Cappellen 氏である。

表 3.2 MFAA コンソーシアム参加機関 (2016 年 10 月現在) <sup>\*a</sup>

Full members	国	担当技術
ASTRON <sup>*b</sup>	オランダ	システム設計
KLAASA <sup>*c</sup>	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 <sup>*d</sup>
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

<sup>\*a</sup> 2016 SKA Engineering Meeting における講演スライド [7] に基づく。

<sup>\*b</sup> ASTRON: Netherlands Institute for Radio Astronomy

<sup>\*c</sup> KLAASA: Key Lab of Aperture Array and Space Application, China Electronics Technology Group Corporation No.38 Research Institute (CETC38)

<sup>\*d</sup> MMIC: モノリシックマイクロ波集積回路

## 3.2 MFAA の設計

図 3.1 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 3.2 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 3.3 に示す。

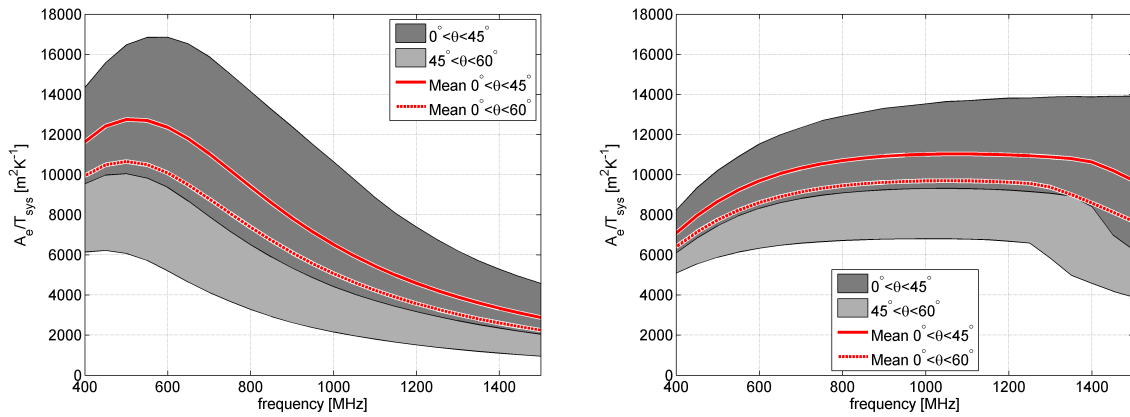


図 3.2 MFAA の感度設計 [7]。2つの図はデザインの違いを表していると思われるが詳細は不明。いずれの場合も天頂からの偏角が  $\theta < 45 \text{ deg}$  では良い感度となっている。

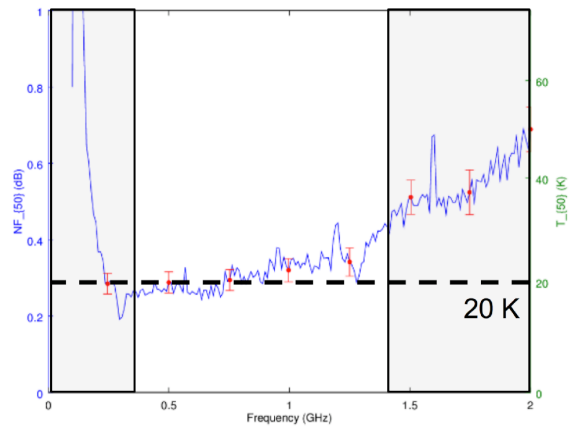
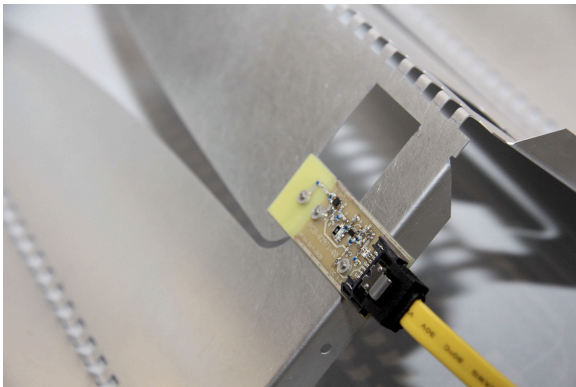


図 3.3 ビバルディアンテナに設置された低雑音増幅器を含むフロントエンド部分と、そのものと思われる雑音指数のグラフ。

## 4 Dish (DSH), SKA-MID

執筆: 中西裕之 (鹿児島大学)

### 4.1 概要

SKA1-MID DISH は図 4.3 に示すような 133 台の口径 15m 鏡と 64 台の MeerKAT13.5m 鏡からなる。光学系は図 4.3 オフセット グレゴリアン式を採用する。アンテナは南アフリカ カルー台地に建設され、最大基線長は 160km とする。主にパルサーや近傍 HI ガスの 21cm 線、連続波の観測を可能にし、さらに OH などの輝線や電波トランジエント、磁気プラズマ、原始惑星系円盤などの観測も可能にする。

主要構成要素は図 4.3 の通りであり、本章では赤枠で囲まれた Dishes & Receivers を中心に述べる。

DISH Work Package Consortium は以下の 8 国、17 機関からなり、オーストラリア CSIRO の Roger Franzen 氏が取りまとめている。

1. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia
2. RPC Technologies, Australia
3. National Research Council, Canada
4. Joint Laboratory for Radio Astronomy Technology (JLRAT), China
5. Max Planck Institute for Radio Astronomy (MPIfR), Germany
6. Vertex Antennentechnik, Germany
7. IAF Fraunhofer, Germany
8. National Institute of Astrophysics (INAF), Italy
9. European Industrial Engineering (EIE), Italy
10. Societ à Aerospaziale Mediterranea (SAM), Italy
11. University of Milano-Bicocca, Italy
12. SKA South Africa, South Africa
13. EM Software and Systems (EMSS), South Africa
14. Universidad P ú blica de Navarra, Spain
15. Universidad de Cantabria, Spain
16. Instituto Geogr á fico Nacional, Spain
17. Chalmers University/Onsala Space Observatory, Sweden
18. Omnisys Instruments AB, Sweden

## 4.2 設計

周波数帯は 350MHz から 13.8GHz をカバーし、5 バンドに分けられる。Band1 が 350–1050MHz、Band2 が 950–1760MHz、Band3 が 1650–3050MHz、Band4 が 2800–5180MHz、Band5 が 4600–13800MHz をカバーする。Band5 はさらに Band5a (4.0–9.25 GHz) と Band5b (9.0–16.7 GHz) に分割され、16.7GHz 以上の周波数についても拡張は可能とする。単一フィードは 5 台搭載可能とし、Phased Array Feed が搭載される場合は Band 1 と交換となる。いずれも縦横直交 2 偏波を受信し、全ストークスパラメータ (I, Q, U, V) を出力する。交差偏波識別度は HPBW 内で 15dB 以上とする。

駆動範囲は Elevation Limit は 15° 以上とし、Azimuth 方向は  $\pm 270$ deg とする (ただし北方向を 0deg、東方向を 90deg とする)。ポインティング性能は風速 7m/s 以下で 10" 以内、風速 7–20m/s の強風下でも 180" 以内での再現性が要求される。開口能率は 60% (350MHz) から 78% (600–8000MHz) を満たすことが要求される。

SKA1 DISH の 1 台あたりの感度は図 4.3 に示す通りである。MeerKAT を含めない SKA1 DISH のみから成るアレイ全体の感度は、Band1 の 350MHz で  $272 \text{ m}^2/\text{K}$ 、650–1050MHz で  $545 \text{ m}^2/\text{K}$  を満たすこと、Band2 および 3 では  $916 \text{ m}^2/\text{K}$  を満たすこと、Band4 および 5 ではそれぞれ  $833$ 、 $699 \text{ m}^2/\text{K}$  をそれぞれ満たすことが要求される。1 台あたりの物理開口面積は  $\pi 7.5^2 \times 133 = 23503 \text{ m}^2$  であるため、要求されるシステム雑音温度は Band1 の 350MHz で 86K、650–1050MHz で 43K、Band2 および 3 で 26K、Band4 で 28K、Band5 で 34K が要求される。

Band1,2 の同時受信帯域幅は、それぞれ 700, 810 MHz とし、両バンドでサンプリング周波数は各偏波で少なくとも 2.0GHz とする。Band3,4 の受信帯域幅は、それぞれ 1,400, 2,380 MHz とし、両バンドでサンプリング周波数は各偏波で少なくとも 5.0 GHz とする。

サンプラーの有効ビット数は Band1,2 で 8bit、Band 3 で 6、Band 4 で少なくとも 4、Band 5 で少なくとも 3 とする。

隣り合うバンドでは、隣り合うバンドの中心周波数の中点をチャンネルバンド端 (Channel band edge) と定義する。チャンネルバンド端で  $-3 \text{ dB}$  を満たし、そこから隣のバンド中心周波数で  $-60 \text{ dB}$  を満たすよう単調に減少するものとする。隣り合わないバンドからのリークは  $-60 \text{ dB}$  以下とする。チャンネル数は  $65,536 \pm 20\%$  とし、チャンネル間のばらつきは  $\pm 0.01 \text{ dB}$  以下とする。分光計は 0.4 MHz, 0.8 MHz, 1.6 MHz, 3.2 MHz, 6.4 MHz, 12.8 MHz, 25.6 MHz のバンド幅をもつズームウィンドウを 4 つまでとることができるものとする。各ズームウィンドウは 16,384 チャンネルに分光できるものとし、チャンネル間隔は単一であるとする。またズームウィンドウの中心周波数は 0.1MHz 刻みで設定できるものとする。ズームウィンドウ外からの信号の漏れだしは  $-60 \text{ dB}$  以下とする。ビジビリティの積分時間は 0.14 秒から 1.4 秒の間で設定できるものとする。

Band1 は建設および運用コストの制限から冷却なしの常温受信機とし、Band2–5 では OMT およびカップラーを 70K、初段 LNA を 20K に冷却する。冷凍機は MeerKAT の建設の教訓から Gifford-McMahon(GM) 冷凍機を検討している。



## 4.3 課題

DSH における大きな課題の一つは運用コストであり、特に消費電力が大きな割合 (24%) を占めている。1 台あたりの消費電力は約 9kW であり、そのうち He コンプレッサーの 5kW と 56% を占め、望遠鏡駆動に 1.7kW に 19% と続く。ゆえに最大の課題は冷凍機の消費電力の削減であると考えられる。

東芝 研究開発センターで開発された高温超伝導フィルターはこのような問題を解決しうるものとして期待される。このフィルターには真空ギャップがあり、断熱性が高いため、冷却負荷を最小限に抑えることができる。そのため現在検討されている GM 冷凍機の代わりに Stirling 冷凍機でも十分冷却が可能である。また GM 冷凍機に比べ駆動部が少ないため、メンテナンス回数が少なく出来るメリットがある。

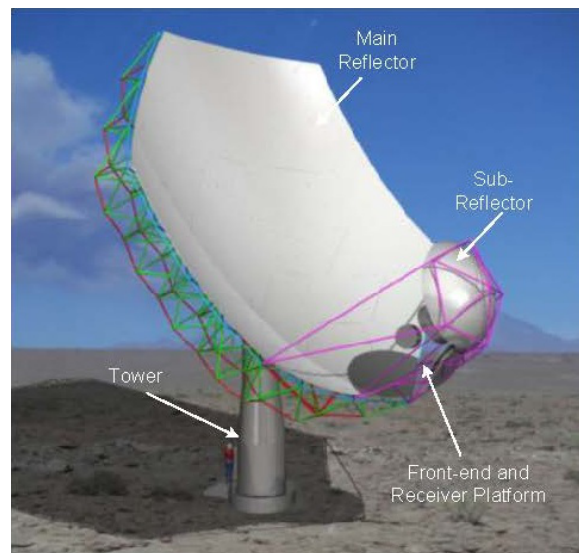


図 4.1 SKA1 MID DISH の最終デザイン。

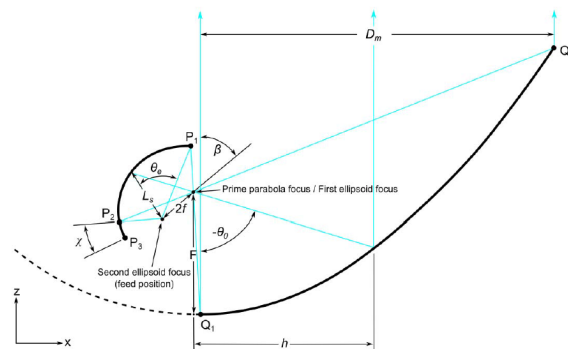


図 4.2 SKA1 MID DISH の光学系。オフセットグレゴリアン式を採用する。

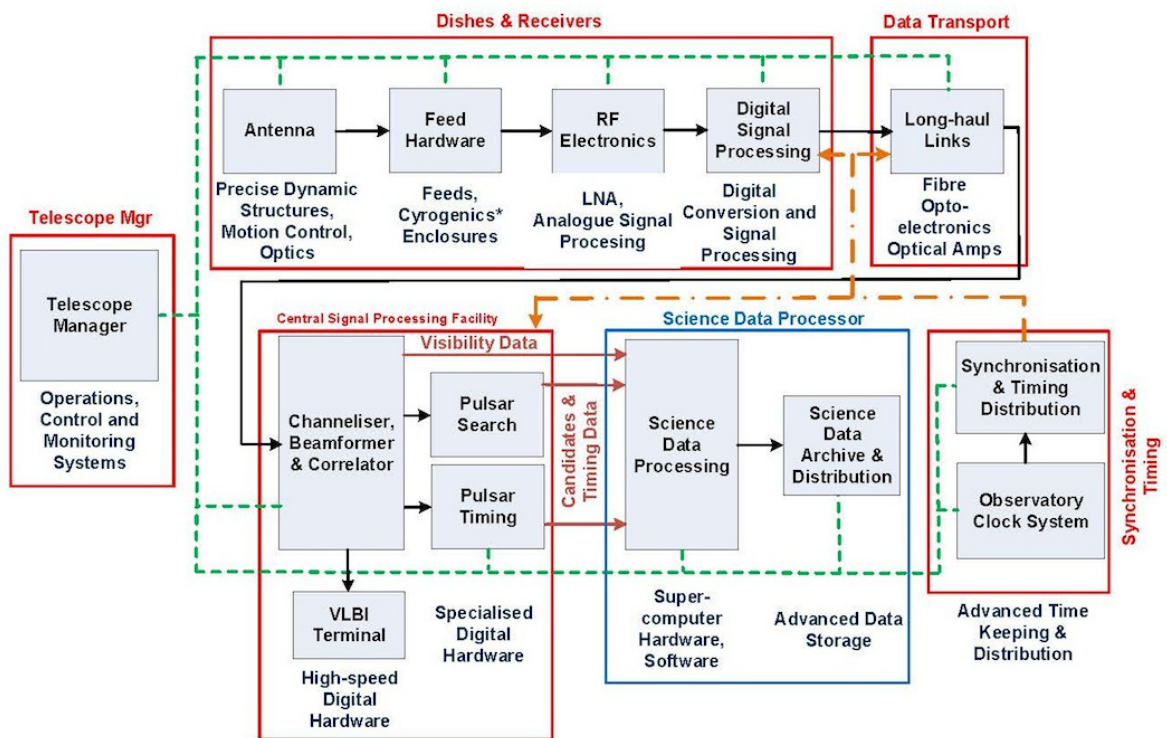


図 4.3 SKA1 MID の主要構成要素。

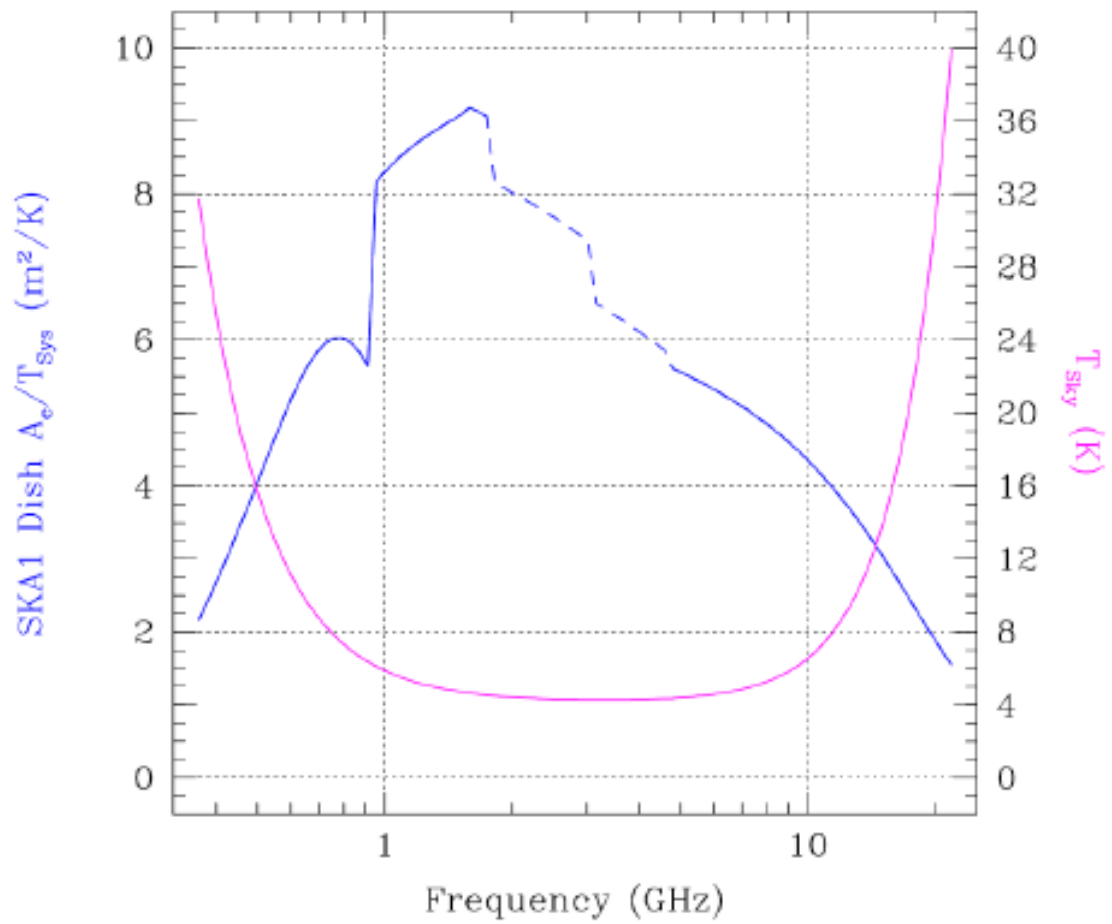


図 4.4 SKA1 MID 1 台あたりの感度曲線。

## 5 Wide Band Single Pixel Feed (WBSPF)

執筆: 氏原秀樹 (NICT)

### 5.1 フィードアンテナ概論

詳細な説明は電磁気学の教科書を参照していただくことにして概略を述べる。フィード・アンテナは一次放射器あるいは単にフィードとも呼ばれるが、送信アンテナに用いる場合はアンプの出力につながれた同軸線路などの入力端子から空間へと電磁波を放射し、主鏡を照らすアンテナである。受信アンテナでのフィードは Maxwell 方程式で時間反転させて考えれば良いが、主鏡が集光した電磁波を焦点付近で拾いアンプへ入力する。効率の良いフィードの設計に必要なことは、アンプ側端子の導波路と主鏡側の自由空間双方に対するインピーダンスとモードの整合である。これらの条件は Maxwell 方程式が要請する電場・磁場の連続条件から直接的に導かれ、フィードの開口径や形状は使用するアンテナ光学系に適合するように設計されねばならない。ここでいう開口径は機械的なサイズではなく電気なサイズ、すなわち電磁場の分布範囲であることに注意してほしい。例えばダイポールやテーパスロットアンテナの主ビームの放射側から見た形は線状であり電場に垂直な方向の幾何学的なサイズは波長に比べて 0 とみなせるが、場の存在範囲は波長以下にはなり得ない。したがってホーンアンテナやレンズ、反射鏡など幾何学的開口径が明確に定義できるアンテナとは異なり、これら線状アンテナに対して実効開口面積と幾何学的面積の比である開口能率を定義・測定する場合はその妥当性を注意深く吟味する必要がある。アンテナ開口面上の電磁場の分布形状と開口面の幾何学的形状は一致しない。例えば、円形開口を持つ通常の円錐ホーンアンテナの内部の電磁場は TE<sub>11</sub> モードで伝播する (図 5.1 参照)。良導体の壁に電場は垂直となるから電場ベクトルは平行にならないし、電場に垂直な方向の強度分布は余弦状となる。遠方界ビーム形状は軸対称とならず、電場に平行な方向が狭くなる。しかし同じく円形開口を持つコルゲートホーンアンテナの開口面電場分布は電場が平行かつ軸対象な分布となる HE<sub>11</sub> モードであり、遠方界ビーム形状は軸対称となる。一般的な電波望遠鏡の焦点像は軸対称で、後者の方がモードの整合性が高いために開口能率が良い。これがコルゲートホーンが好まれる理由の 1 つである。いずれにせよ、フィード開口面にアンテナ光学系が作る像の電磁場分布と管内を伝播する電磁場分布は完全には一致しない。この開口面での電磁場の連続条件とエネルギー保存則を満たすために反射波が必要であり、それが損失となる。

なお、フィード単体のゲインや 3dB ビーム幅 (いわゆる半値幅) は設計目標となりえないことを注意しておく。開口能率の高いアンテナを実現するためにフィードを開発するのであるから、主鏡の縁まで均一に、縁の外は極力照らさないビームパターンが好ましい。そのようなパターンの例を図 5.2、図 5.3 に示すが、アンテナ単体でのゲインは一般的なアンテナより低めとなるどころかビームの中央が窪んでいても構わない。ただし理想的な矩形分布は物理的に極めて困難であるし、実現したとしても主鏡の照射分布のフーリエ変換が主鏡のビームパターンとなるから非常に高いサ

イドロープが発生してしまい好ましくない。

また、「フィードの開発」というと空間への放射構造に注意が行きがちであるが、同軸線路などの端子からの給電部の開発も重要である。リターンロスは十分低い必要があるし、フィードで受信した直交する2つの偏波が綺麗に分離できねばならない。多数の素子アンテナを束ねる PAF では隣接素子とのカップリングを考慮して設計しないと、素子単体とアレイでの動作が異なってしまう。高周波であれば製作精度、低周波であれば測定時のアンテナ周囲の導体配置が測定結果に影響する。なので計算機の中の理想的な入力ポートと理想的な電波吸収壁によるシミュレーションだけでは不十分であり、良いデザインが得られたとしても試作機による検証が必須である。この開発過程において、設計自由度には注意を払っておく必要がある。先に述べた円錐ホーンであれば開口径と軸長さのみでビームパターンが決まるので、設計自由度は2である。この自由度で開口面での TE11 モードの分布範囲と波面曲率を制御する。これを各々 10 ステップ変えて性能を評価したところで  $10^2$  を試行するに過ぎない。複モードホーンであればホーン内のフレアアングルの変化する位置と半径で自由度が2増え、TE11 モードに対する TM11 モードの振幅比と位相差を制御でき、ビーム形状と交差偏波特性が改善できる。コルゲートホーンであれば適切な溝のピッチと幅、深さが加わるため、溝の形状が種類のみとして  $10^5$  となる。制御するのは開口面での HE11 モードの分布範囲と波面曲率、および HE11 モードの純粋度を制御する。10 秒でシミュレーション解が得られるなら  $10^6$  秒で、約 280 時間、12 日くらいである。実際のコルゲートホーンであれば溝の設計は理論からおよその見当がつくのもっと短時間で済むのだが、広帯域フィードのように評価すべき周波数点が増えればそれに比例して計算時間は伸びる。特性を改善すべく形状を複雑にすれば、試行すべきパラメータの組み合わせは爆発的に増えていく。巡回セールスマン問題と同様に「真の最適解」を探すのは極めて困難となるが「実用上十分な最適解」を得るだけでもかなり大変である。しかも論文には全ての寸法値の記載があるとは限らず、結果が再現できるかどうかは読者の教養と才能に依存していることは珍しくない。これが広帯域フィードの開発が「難しい」本質的な理由である。

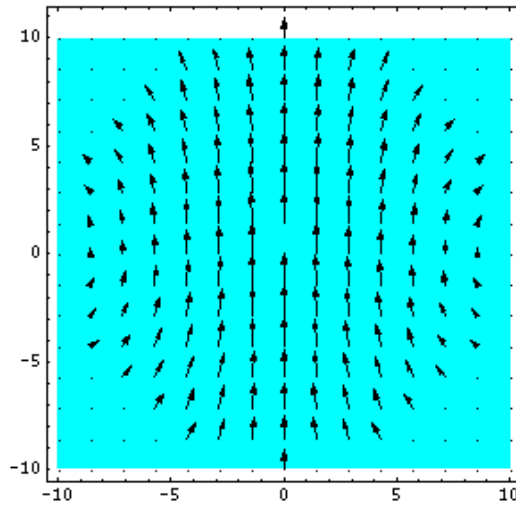


図 5.1 円形導波管の TE11 モードの電場分布

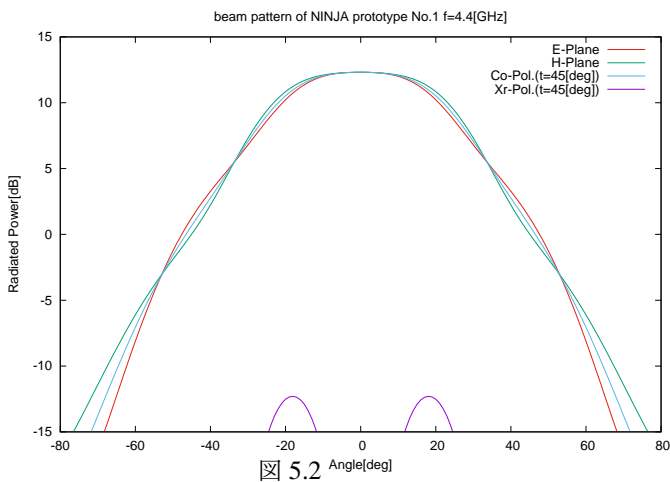


図 5.2

コルゲートホーンのビームパターンの例 1

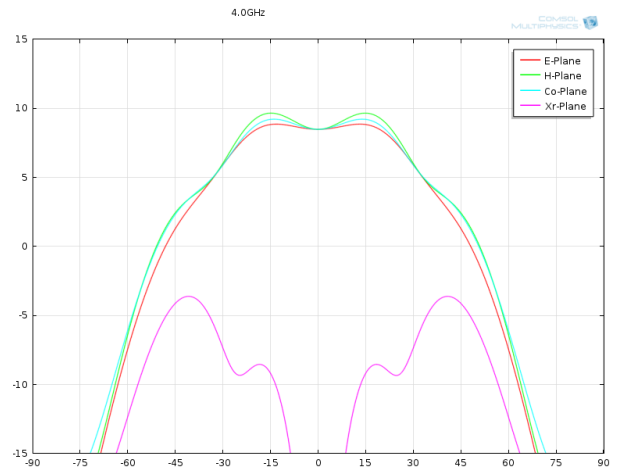


図 5.3

コルゲートホーンのビームパターンの例 2

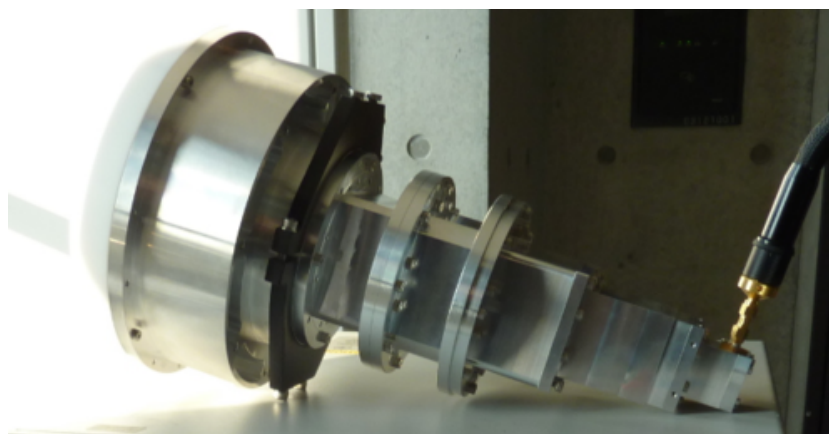


図 5.4  
OMT をつけたニンジャフィード

## 5.2 SKA における広帯域フィード

フィードの受信帯域はバンド 1 が 0.35-1.05GHz、バンド 2 が 0.95-1.76GHz、バンド 3 が 1.65-3.05GHz、バンド 4 が 2.8-5.18GHz、バンド 5 が 4.6-13.8GHz となっていた。フィード及びアンプは丸ごと 20K 程度に冷却するか、フィードのみを 85K として性能が検討されている。特に低い周波数においてフィードは嵩張るため、能力の高い冷凍機が必要になるからである。現在検討されているフィードは QRFH(Quad Ridge Flared Horn) とコルゲートホーンである。前者の最高・最低周波数比は 3:1 でバンド 1 と 5 用に、後者は 1.85:1 でバンド 2、3、4 用に検討されていた。前者の構造は円錐ホーンの中に 90 度毎にリッジを設けたものであり、対向するリッジがそれぞれ直交 2 偏波に対応する同軸コネクタ端子へ電磁波を導く。後者は電波天文学で広く使われているが、ホーンの内壁の円周上に周期的な溝を設けたもので、溝が人工誘電体として動作する。製作が容易でビーム幅が広い、開口面から溝を切ったコルゲートホーンの実例を図 5.5 に示す。金属などの良導体壁に対して電場は垂直となるが誘電体壁には斜めに入射でき、結果的に管内に電場の平行性が高く電力分布が軸対称となる HE11 モードを伝播させることができ、軸対称性がよく交差偏波とサイドローブの低いビームを作ることができる。しかし、コルゲートホーンで直交する直線 2 偏波を受信するためには OMT(直交偏波分離器)が必要である。この OMT とコルゲートホーンは溝のない導波管で繋がれていて、TE11 モードを介して結合することになる。これの次のモードである TM11 は周波数比で 2.07 倍となるので、コルゲートホーンは受信周波数比 1.85:1 で設計される。高次モードが発生すると HE11 モードの綺麗なビームを歪めてしまうためである。したがって開口能率がよくてサイドローブレベルやスピルオーバー、交差偏波などの雑音が高いフィードが必要ならコルゲートホーンが最善であり、これらを妥協してでも帯域幅が必要であれば QRFH を使う計画である。実際、バンド 5 では QRFH は要求仕様が満たせないためにコルゲートホーン 2 本でバンドを分割する提案があり、採用された。平均 A/T が天頂および仰角 60 度で 6.1 以上、最小値で 4.9 以上という要求を QRFH は満たせず、ベースラインデザインでは天頂:5.9/60 度:5.7、天頂 5.4/60 度:4.8 と緩和したが未だ QRFH では実証されていないので、4.6-8.5GHz と 8.3-15.3GHz に分割してコルゲートホーンとする案であった。本質的に QRFH は設計が難しく、サイドローブや交差偏波を下げにくい。これらを考慮してオフセットグレゴリアン光学系を採用したのに、そのメリットを引き出せなくなってしまう。しかもコルゲートホーンと比べて QRFH が劇的に安くはならないので、感度を優先してバンド 5 は分割された。

ところで前説の設計自由度と計算時間の議論で図のコルゲートホーンの場合を見積もると、周波数方向に 10 点評価するなら  $10^{12}$  秒、すなわち  $10^7$  日、約 300 年となり非現実的な値になる。加えて前節の 1 モデルあたり 10 秒という計算時間はフィードの形状が単純でモード整合法が利用できる場合であり、3 次元モデルでのシミュレーションが必要な場合の計算時間は数十分から数十時間となることは珍しくない。しかし現実に広帯域フィードが設計できているのは、解になり得ない、あるいは性能が出そうにないパラメータの組み合わせを捨て、有望そうなもののみを検証しているからである。つまり設計者が許容された期限内に試せるのは設計自由度のパラメータ空間のご



く一部のみなので、出来上がった広帯域フィードの性能や形態には大きな差異が生じる。

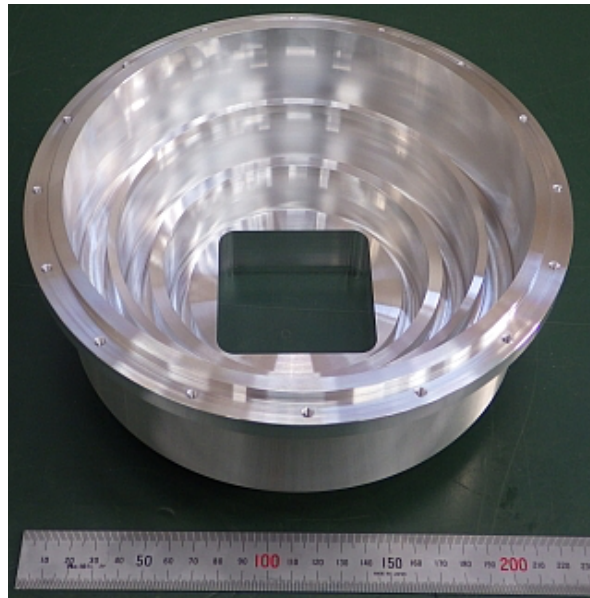


図 5.5 SKA バンド 2,3,4 と同種のホルゲートホーン。ニンジャフィードでも使われている。設計自由度は (=各溝の座標と幅、深さ) とフィードの外形 (=長さと開口径) が 2 の総計で  $3 \times 3 + 2 \equiv 11$

### 5.3 他機関の広帯域アンテナの開発

測地 VLBI においてもアンテナの広帯域化が進められており、VGOS(VLBI2010) と呼ばれている。様々な広帯域フィードが開発されてきたがビーム幅が広い (光軸中心から光学系の縁までが 50 度程度) ためパラボラの主焦点にフィードを置くか、新たにリングフォーカス光学系のアンテナを建設して使用する。リングフォーカス光学系の副鏡はカセグレンやグレゴリアンと異なり、フィードのビームの電力分布を動径方向に反転させる。すなわち電力の大きいフィードのビームの中央を主鏡の縁に、小さい縁を主鏡の中心に写像することで主鏡面での照射分布を均一化させる。そもそも VGOS では従来よりも早い駆動速度が必要であったため、そもそもアンテナを新規建設したほうが好ましかったし、測地用のアンテナは電波望遠鏡と違って焦点に置くフィードは 1 個だけなのでリングフォーカスで主鏡の照射分布を改善して開口能率を向上させる戦略は合理的である。また、ビーム幅の広いフィードはコンパクトであり、シミュレーションに必要な計算機リソースも小さくて済む。このフィードを利用して国内では 2014 年に国土地理院が石岡に VGOS 仕様 (口径 13m、受信周波数 2-14GHz、記録速度 16Gsp/s) のアンテナを建設し、測地 VLBI アンテナとして運用している。

## 5.4 NICT 時空標準研究室 (鹿島) における広帯域アンテナの開発

情報通信研究機構 (NICT)・時空標準研究室では遠隔地間での原子時計の高精度な比較手段の研究開発を行っている。光ファイバや衛星双方向通信、VLBI などの方法があるが鹿島グループでは VLBI を担当している。従来は測地 VLBI に利用される S/X バンド (2GHz/8GHz 帯) を利用していたが、比較精度向上のためには感度向上を図る必要があった。このため 2010 年代から広帯域フィードやダイレクトサンプラなどの広帯域受信系を開発し、さまざまな観測に利用している。このプロジェクトは「ガラパゴス・VLBI」と名付けられ、略して Gala-V と呼ばれている。受信周波数はアンテナ周辺の RFI を調査した上で冗長データを削減するための最小限の周波数配列として、3.2-4.8GHz, 4.8-6.4GHz, 9.6-11.2GHz, 12.8-14.4GHz の各 1.6GHz 幅 x4 バンドとした。最初 (2013 年末) に 34m アンテナに搭載された広帯域フィードはイグアナ・フィードと名付けられ、6.5-15 GHz で開口能率 30-50 % で観測に使用されている。これは同軸ホーンとして設計されていて、大きくて設計が複雑になる低い側の 2 バンドは後日搭載とし、先に試作した高周波側の 2 バンドを受信する中心のフィードのみを利用して早期に観測を開始することを意図したものであった。続けて 2015 年夏にはニンジャ・フィードと呼ばれる 3.2-14.4GHz を 1 本でカバーする広帯域フィードが搭載された。このフィードは鹿島 34m アンテナとともに Gala-V で使用される 2.4m の可搬型小型局 MARBLE にも搭載されている (図 5.6、図 5.7)。これらはビーム幅が狭いカセグレン光学系の広帯域フィードとしては世界初のものである。また、どちらのフィードも前節で問題とされた高次モードをビーム形状の改善に積極的に活用しており、一般的なコルゲートホーンに比べて開口能率は劣るものの制作費が安く、コンパクトで軽量である。国立天文台の共同研究開発経費の補助のもと、6.7/12.2GHz のメタノールメーザを同時に観測することも可能な設計とした。当初は直線 1 偏波での受信でプロジェクトを開始したが、2015 年には直線 2 偏波で受信できるように広帯域 OMT (直交モード変換器) も開発した (図 5.4)。この OMT は 2016 年春に実際に 34m アンテナに搭載して試験を行なったが、2GHz 帯の携帯や無線 LAN が非常に強くて実用に適さなかった。将来は受信周波数を S バンドまで拡大できる余地をもたせて設計したためだが、この余地を削り 2 GHz 帯 RFI を十分に抑圧するように再設計して小金井の MARBLE で使用中である。

サンプラは Gala-V 仕様に適合する Galas と呼ばれる最大 16Gsps のサンプラを開発・使用しており、周波数変換を要しない。34m アンテナから受信機室へは RF 信号をアナログで光に変換しサンプラに接続しているが、波長多重により 2 偏波分を 1 本のファイバで伝送している。またフィードに直結する初段 LNA は常温で、現状のシステム雑音温度は 150K 程度である。広帯域相関処理ソフトの開発のためにも早期にプロジェクト観測を開始する必要があったため、当初は極力シンプルかつ低コストな構成でプロジェクトを始め、徐々に性能を高めていく戦略とした。鹿島での広帯域システムの開発は相関ソフト、サンプラ、アンテナ光学系及びフィードの 3 項目それぞれで担当者が各 1 人であり、フィードや OMT の製作は所内の試作室が担当している。予算規模は小さいながらも各担当内では設計会議を必要としないので大きなトラブルもなく開発を進めることができた。

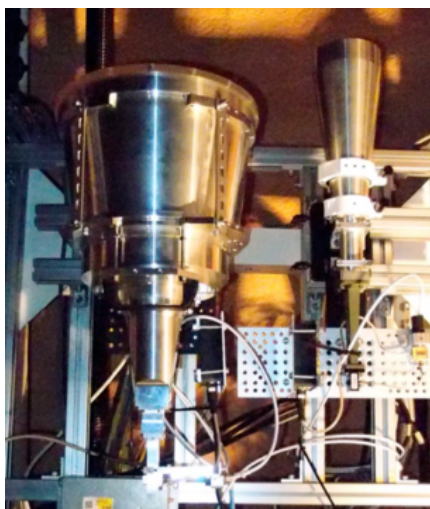


図 5.6  
鹿島 34m アンテナに搭載したニンジャフ  
ィード (左) とイグアナフィード (右)



図 5.7  
小金井 2 号館屋上に設置した 2.4m 小型可  
搬局 MARBLE

## 5.5 国内の開発体制と SKA

バンド 5 の議論に見るように、やはりサイエンス目標を効率良く達成するための感度が最重要の関心である。予算や電力など必要な資源の問題の解決は、あくまで科学目標を達成するための手段にすぎない。それでも SKA では大規模かつ複雑すぎていてリソース配分のバランスを取るのが難しい。

現状、残念ながら国内で広帯域アンテナと観測システムを独自に開発し、運用しているのは NICT だけであるが、その成果を SKA に適合させるための開発は予算がつかないために手をつけられない。他方、SKA で必要とされる様々な技術開発において、日本独自かつ優位性を持つものは見当たらない。大抵は類似の技術が他国にもあり、開発が先行していることが多いし、そうでなくても開発リソースが大きいグループが追い上げ、追い抜いてしまう可能性は十分にある。提案や既存の技術のアレンジにとどまるのならともかく、能力のある (=「やる気がある」とか「興味がある」) ではなくて「本当に能力がある」) 人材と十分な開発予算がなければ技術開発での参入は厳しいのではなかろうか。

## 6 Phased Array Feed (PAF)

執筆: 川口則幸 (上海天文台)

### 6.1 概念

SKA 計画における PAF(Phased Array Feed) はパラボラアンテナの一次焦点に設置することを想定した Phased Array Antenna(位相合成アンテナ) である。位相合成アンテナは多数の微小素子アンテナで受信された信号の位相を制御・合成し、ビームの指向方向を変化させるものである。位相制御を電氣的に実時間で行う位相合成アンテナは Electric Scanning Antenna (ESA) とも呼ばれる。機械的に指向方向を変える従来型のアンテナと異なり、電氣的に短時間でビーム方向を変化させることができる。ESA は高速に飛翔するターゲットを追尾するレーダーなどに実用化されている。

位相合成値を変えた複数の合成出力を持つことで、異なる指向方向のビームを同時に形成することもできる。この機能は電波天文観測に有用で、広い観測領域を複数のビームで同時に観測することで、ビーム幅の狭い高利得アンテナでも広視野を達成することが可能になる。サーベイ速度が格段に向上することから、PAF によるマルチビームアレイが SKA-2 の重要な開発項目の一つになっている。また、複数の天体を同時に観測することができる機能は、広視野を得ることを目的とした電波天文観測だけでなく、電波位置天文観測にとっても重要である。位置基準天体とターゲット天体を同時に観測することで、大気の揺らぎによる大きな位相変動を補償したり、大気の厚さの非一様性に伴って生じる天体位置誤差を規整することも可能になる。ただし PAF を電位置天文観測に応用した実観測例はいまだない。任意の複数の天体を選択して観測する機能を実用に供している電波望遠鏡には、国立天文台水沢 VLBI 観測所が開発した可操縦型 2 ビーム電波望遠鏡 (VERA) のみである。しかし、VERA ではビーム数が 2 つと限定されており、しかも機械的に受信点を移動させて 2 つの天体を選択するので、瞬時に観測天体ペアを切り替えることはできない。PAF であれば瞬時にビームを合成できるので複数の位置基準天体を短時間で参照することができ、天体位置決定精度の高い精密な観測が可能になる。

高利得でかつ視野の広さを目指して開発された最新の電波望遠鏡の受信装置ではマルチビーム受信機を搭載している。例えば野辺山宇宙電波観測所のマルチビーム受信機 (FOREST) や名古屋大学の NANTEN2 がある。複数の固定フィードに接続した複数の受信機 (センサ) で広視野を得ている。またグリーンバンク 100m 望遠鏡に搭載された Mustang2 は、338 素子で構成される焦点面アレイを持っている。しかし、実時間で任意に制御可能な位相合成機能がないので、ビームの空間的配置は主ビーム軸を中心に固定されている。複数のビームの中から特定のビームを選択して受信したり、選択したビームで受信した信号を VLBI 記録したりすることはできない。グリーンバンク 100m で実用化されているマルチビーム受信機は K バンド (7 ビーム) と W バンド (200 ビーム) と高い周波数帯に限られている。後述する SKA 向け PAF は実証試験のために搭載され科学観測は行われたが、共同利用にはまだ提供されていない。

PAFは単一フィードと比較して多くの利点を有しているが、デメリットとして考えられるものに利得の低下がある。機械的な電気軸に対して合成ビームを大きくシフトさせた場合（オフセット角度を大きくした場合）に大きな利得の低下が発生する。回転するレーダアンテナの場合にはボアサイト利得は常に一定で指向方向は機械的に変化されるが、機械的に固定され電氣的に指向方向を変えるPAFの場合、大きなオフセット角を与えた場合に著しく利得が低下する。PAFをパラボラアンテナの一次焦点に設置した場合、大きなオフセット角を必要とする場合には機械的に主反射鏡の電気軸を変化させ利得の低下を最小限にとどめている。

焦点距離の長いカセグレンアンテナ（VERA20m鏡や鹿島34鏡など）の焦点（二次焦点）にPAFを置く場合には、一次焦点からの主鏡見込み角よりもはるかにシャープなビームで副鏡を照射する必要があり、物理的に大きなPAFが必要になる。さらに数度以上の大きなオフセット角を実現するためにはさらに大きなPAFが必要となる（VERA20m鏡の場合には直径3m以上）だけでなく、焦点面が平面でなく曲面になることも考慮しなければならない。

SKA計画のDish（開口面アンテナ）ではグレゴリアン光学系を採用することで副鏡の近くに二次焦点を置き、DISHのWBSPF(WideBand Single Pixel Feed)やPAFのビーム幅は広くても良い光学系となっている。SKA-1で設置されるDISHのWBSPFを、SKA-2ではPAFに置き換えることが計画されている。ただし、現状のグレゴリアン光学系ではビームオフセット角を大きくとるために副鏡の大きさを若干大きくする必要があると指摘されている。また、二次焦点（給電位置）が副鏡に近いために、受信機を支える支持柱の強度と熱変形も問題になっている。

SKA-1計画のベースライン変更により「SKA-Survey」はなくなり、PAFはSKA-2以降での導入（SKA-2/PAF）となった。後述するように、AIP（Advanced Instrumentation Program）でWPC（Working Package Consortium）が設立され、SKA-2に向けてPAFの検討、試作検証実験が進められている。

また、SKA計画においてPAFに近い概念のものにAA（Aperture Array）がある。これは、地上に固定された複数の素子アンテナを多数配置したもので、微小素子アンテナのビーム幅は広いので利得の低下は少ない。利得の低下は $\cos$ 関数で規定されるので3dBの利得低下に対応するオフセット角は $\pm 60^\circ$ で $120^\circ$ もの広い視野角が得られる。但し、一般的な電波望遠鏡の主鏡の面積にあたる部分を微小素子アンテナで埋め尽くす必要があるため、増幅素子の数だけでも膨大な量が必要となり、SKA計画の中でも多額の予算を必要としている。SKA-2以降での検討課題である。しかし、素子アンテナの選定、位相合成システムに関するPAFの実証研究成果はAAに引き継がれるであろう。

地上に固定された球面鏡とPAFを組み合わせた大望遠鏡が中国で建設されている。FAST(Five hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope)とよばれているこの望遠鏡では、球面鏡の焦点位置にPAFを設置して高利得・広視野を実現しようとしている。カナダやオーストラリアの研究者が試作機を開発してFAST計画に貢献している。SKAへの日本の貢献を考えた時、試作機開発を通じた貢献方法として学ぶべきことが多い。ただし、SKA計画の最終的な実現のためには、PAF受信機を多数のDISHに搭載しなければならないので、全面的貢献には大きな困難と膨大な開発経費が必要となるであろう。

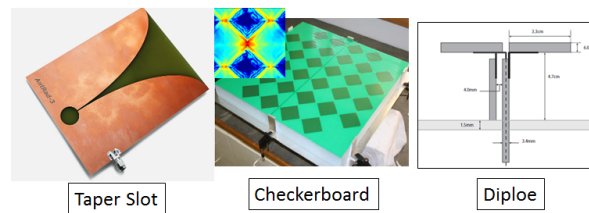


図 6.1 PAF の放射素子

## 6.2 現状の設計・開発状況

SKA-1 では導入されないが、SKA-2 向けの「Advanced Instrumentation Program (AIP)」で PAF の検討と試作機開発が進められている (SKA-AIP)。主要メンバーは NRC (Canada)、ASTRON (The Netherlands)、JBCO (UK)、INAF (Italy)、CSIRO (Australia) で CSIRO が議長を務めている。追加参加の可能性のある機関として JLRAT (China)、MPIfR (Germany) があげられている。  
([https://indico.skatelescope.org/event/402/material/2/2.pdf#search=%27SKA+AIP+PAF %27](https://indico.skatelescope.org/event/402/material/2/2.pdf#search=%27SKA+AIP+PAF%27), 1-6 October 2016)

PAF は素子アンテナ、増幅素子、ビーム合成回路 (Beam Forming) から構成される。素子アンテナでは現在 3 種類のもので開発されており、電波望遠鏡の一次焦点に設置、試験が行われている。図 6.1 にテーパースロット、チェッカーフラグ、ダイポールという 3 種類の素子を示す。これらの素子を組み合わせてアレイを形成してパラボラアンテナの一次焦点に取り付け、実証試験が進められている。テーパースロット、チェッカーフラグ、ダイポール素子のほかに、伝送ライン素子によるアレイも研究されているが、電波天文分野にはまだ応用例がない [26]。

図 6.2 はカナダ DRAO (Dominion Radio Astronomical Observatory) の 10 m アンテナに搭載されたテーパースロットアレイ (Vivaldi) を示す。

図 6.3 は ASKAP アンテナに搭載したチェッカーフラグ素子の PAF [28] を、図 6.4、図 6.5 はダイポール素子で構成された PAF がグリーンバンク 20m と 100m に搭載された状況を示す。グリーンバンク 100m に試験的に搭載し実証研究に使用された PAF は、共同利用観測などの実観測にはまだ使用されていない [50]。

現在開発中の常温 PAF の雑音特性は図 6.6 に示すものが得られているが、雑音特性の改善のため冷却 PAF の検討も進められている。冷却 PAF の一例を図 6.7 に示す。冷却 PAF は素子アンテナごと冷却するので、消費電力について問題がある。

中国の FAST にも PAF が使用されており、球面鏡の焦点に設置して使用されることになっている (図 6.8)。広帯域給電が可能な単一ホーンとしては SKA1-MID の Band1 と Band2 のほぼ全域をカバーする広帯域ホーン・受信機が提案されている [34] (図 6.9)。周波数は 270-1620 MHz、ビーム幅は 120 度 (FWHM) で中国の FAST 用に開発されている。大きさは 1.45m の方形で重さは 189kg、給電損失を含めた雑音温度は 21K となっている。SKA/DISH に搭載することを想定

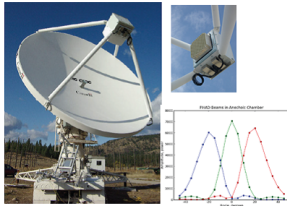


図 6.2 DRAO-10m アンテナに搭載された Vivaldi PAF[27]



図 6.3 ASKAP アンテナに搭載された Checkboard PAF[28]

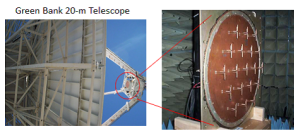


図 6.4 Green Bank 20m アンテナに搭載された Dipole PAF[29]

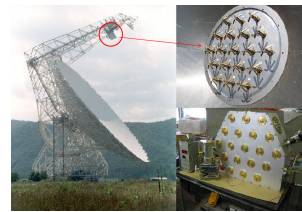


図 6.5 Green Bank 100m アンテナに搭載された Dipole PAF[30]

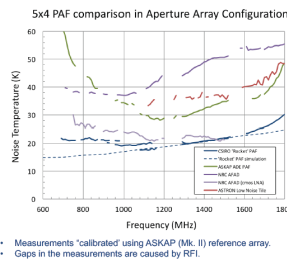


図 6.6 常温 PAF の雑音性能



図 6.7 冷却 PAF の開発例

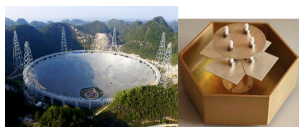


図 6.8 中国 500m 望遠鏡に搭載される PAF[31]

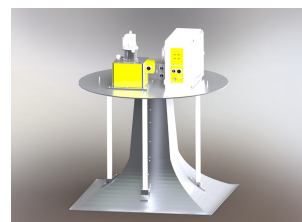


図 6.9 FAST 用 Band1,2 受信機の例 [34]

するとホーンについては参考にはならないが、冷凍機による冷却温度が 11K であること、受信機端帯雑音温度が 15K であることなどは参考になる。また、円偏波変換は低雑音増幅後にハイブリッド合成回路で実現していること、常温増幅部は電子冷却で 40℃に保っていることなどが注目する点である。

PAF の性能試験、特に増幅素子と組み合わせた際の受信機雑音温度の計測は困難で、時として大型クレーンを必要とする場合もある (図 6.10) [32][33]。日本で試作機を製作して性能を確認する



図 6.10 PAF の雑音温度計測 [33]

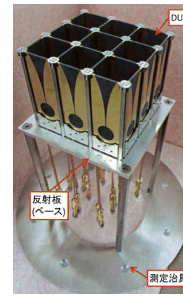


図 6.11 国立天文台が試作した PAF

研究を進める場合には、PAF 受信機により簡便な性能試験方法も合わせて検討する必要がある。性能確認が簡単に行える小型のアレイユニットを複数台組み合わせて「PAF-PAF 合成」を行うのも一つの方法であろう。このためには、小型・軽量、低雑音、低消費電力の高性能アレイユニットが必要であり、高温超伝導アレイ受信機（後述）は一つの解を与える。

日本では国立天文台 RISE グループが Phased Array Feed を科研費で開発した。Taper Slot 素子を 3x3 配列した Phased Array を試作し、放射パターンや周波数特性などが計測された（図 6.11）。

### 6.3 PAF 技術開発における課題と日本の貢献

前節に現状の開発状況を述べたが、本節では将来日本として貢献可能な PAF 実現に向けての技術開発について述べる。PAF を実現するためには、1) 放射素子、2) ビーム合成、3) 低損失フィルタ、4) 低雑音増幅、5) 低消費電力冷却技術、を総合的に検討する必要がある。また、これらの技術要素に対し、目標とする周波数カバレッジ、搭載望遠鏡の形状及び光学系を考慮する必要がある。特に周波数カバレッジでは SKA の周波数プランに基づき開発目標の周波数帯を選定しなければならない。SKA2/PAF では 196 素子のアレイで 6x6 のビーム（2 偏波）を形成することが期待されている。

表 6.1 SKA の観測周波数バンド

SKA Band	周波数範囲
Band1	350-1050 MHz
Band2	950-1760 MHz
Band3	1650-3050 MHz
Band4	2800-5180MHz
Band5-1	5.0-9.25GHz
Band5-2	9.0-16.7GHz

表 1 に SKA で想定している周波数範囲を示す。特に Band2 には中性水素線 (1.4GHz) や OH



線 (1.6GHz) が含まれており、重要である。この周波数帯をカバーする放射素子には、周波数スケールリングも考慮するとダイポールアレイ [35][36]、スタックドマイクロストリップアレイ [37]、シンメトリカルアレイ [38]、グリッドアレイ [39]、進行波アレイ [40]、ピンアレイ [41]、ポータアレイ [42]、自己補対アンテナアレイ [43][44] などが素子アンテナとして提案されている。自己補対の原理は日本人の虫明康人博士が世界で初めて提唱したものであり [45]、ASKAP のチェッカフラグアレイにもこの原理が採用されている [28]。同じ日本人の八木秀次博士の発明した八木アンテナと組み合わせた「自己補対八木アンテナ」が中国の南京科学技術大学で開発されている [46] (図 6.12)。しかし、この素子を使ってアレイを形成し、PAF として望遠鏡に搭載し実用化した例はいまだない。

高温超伝導には日本独自のマイクロ波技術があり、この技術を使って L バンド帯の電波干渉を除去したり [47]、アレイとして使用している例がある [48][49]。図 6.13 に、4x4 のアレイ素子を高温超伝導受信機で位相合成したアレイ受信機の外観を示す [48]。グリーンバンク 100m 鏡の S バンド (1.73-2.60 GHz) 受信系には、LNA 後段に超伝導フィルタを導入し、Sirius や XMM などの通信衛星波による干渉波を除去している [50]。SKA/DISH が設置される予定で、地上干渉波が少ないであろう南アフリカでも上空から到来する衛星干渉波は避けられない。日本独自の高温超伝導技術による低損失干渉除去フィルタは、SKA に大きな貢献をするであろう。

SKA-AIP/PAF はすでに試作検証を含めた実用化研究がすでに進められ、現状の素子アンテナや低雑音増幅素子、アナログ回路によるビーム形成研究に新規に参入することは困難であると思われる。しかし、今からでも可能な貢献には、1) より広帯域な素子アンテナの研究、2) デジタルビーム形成技術、3) デジタルビーム選択・VLBI 記録、などにはまだ余地があり、試作機を開発して実証研究を進める道はまだ残されていると思われる。虫明自己補対+八木素子アンテナ [46] を搭載した高温超伝導アレイユニット (干渉除去フィルタ内臓) の出力を周波数変換することなしに直接 AD 変換し、デジタル合成ロジックでビーム形成するとともに、任意ビームの複数選択と VLBI 記録を持った PAF を実現することなどはその一例で、日本の電波位置天文学研究の将来にとっても重要である。試作機は小型のアレイユニットとし、ビーム幅が広くても良い現在の SKA/DISH に適合するものとする。その小型・軽量、低雑音、低消費電力の特性は、現在の SKA/DISH で問題になっている受信機支持柱への負担を軽減するものになろう。4x4 のアレイを持つ高温超伝導ユニットを導入すれば、VERA20 鏡のカセグレイン二次焦点で L バンド (1.6GHz) の給電が可能になるとと思われる。例えば文献に示されているアレイ素子の周波数特性 [46] を周波数スケールリングすると SKA/Band2 のほぼ全帯域に当たる 1.1-1.8GHz が受信可能となるであろう。これは、我が国における HI や OH 観測研究にも有用である。さらに将来にはアレイユニットを多数地上に敷き詰め、SKA/AA に「面積としての日本分担」に発展させるのも一つの貢献の方法であろう。新しい素子アンテナと干渉除去フィルタを内蔵した 16 素子対応高温超伝導受信機の試作開発が望まれる。

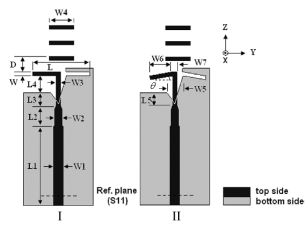


図 6.12 虫明自己補対+八木 [46]

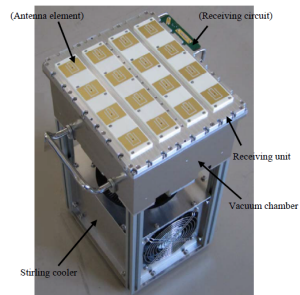


図 6.13 高温超伝導 4x4 アレイ受信機 [48]

## 7 Signal and Data Transport (SaDT)

執筆: 河野裕介 (国立天文台)

### 7.1 SaDT 概要

SaDT の役割 SaDT WPC は以下の 3 つのネットワークを提供する。1) Digital Data Backhaul (DDBH) : アンテナから CSP (Central Signal Processor)、CSP から SDP (Science Data Processor)、SDP から SKA 地域データセンターまでデータを伝送する。2) Synchronisation and Timing (SAT) : 周波数と時刻標準をアンテナ、CSP と SDP に供給する。3) Monitor and Control : Telescope Manager (TM) を含むシステム全体を通じて監視制御情報を送受信する。論理的ネットワーク Production Network (PNET)、Engineering Network (ENET)、Safety Network (SNET) と Network Manager (NMGR) で構成される。

SaDT コンソーシアム SaDT コンソーシアムはマンチェスター大学 (UK) が主導機関となり、ASTRON (The Netherlands), CSIRO Astronomy and Space Science (Australia), Instituto de Telecomunicações (Portugal), Joint Institute for VLBI in Europe (The Netherlands), National Centre for Radio Astronomy (India), National Physical Laboratory (UK), SKA Africa (South Africa), Tsinghua University and Peking University (China), University of Granada (Spain), and AARNet (Australia) and Dante (UK) からなる。

### 7.2 Digital Data Backhaul (DDBH)

DDBH は高速データ伝送ネットワークである。DDBH のネットワークヒエラルキーを図 7.1 に示す。この図のように商用のネットワークと同様のネットワークが基本となるが、商用のものにはない特徴をもつ。片方向のデータ伝送、観測モードで定まる一様なデータレート、無冗長性、高ビットエラーレート耐性などである。またネットワークの設計には、SKA の要求に合うことに加えてコスト、メンテナンス性、独立した運用性・作業性が重要となる。

SKA-MID のコアにあるアンテナからの総データレートは 12 Tbps、アームのアンテナは 4 Tbps である。これらのアンテナのうち 119 基のアンテナは 10 km 以内にあるため、ショートリーチの 100GE 技術が想定される。距離が 10 km から 50 km の 56 基のアンテナのデータの伝送には ER-4 もしくは DWDM (Dense Wavelength division Multiplex) が用いられる。15 基のアンテナは 50 km 以上の距離にあるため、ファイバーラマン増幅器や EDFA (Erbium Doped optical Fiber Amplifier) 等が必要となる。

SKA-LOW のコアにあるアンテナからの総データレートは 7 Tbps、アームのアンテナは 0.7 Tbps である。これらのステーションのうち外側のものは CSP から 80 km 以内に存在し、20 Gbps 接続が求められるため、2 つの 10GbE リンクで接続される。

CSP から SDP までのデータレートは、MID と LOW でそれぞれ 4, 12 Tbps となる。

SDP からユーザーがアクセスする SKA 地域科学技術センターサイトまでのデータ伝送は現在調査・検討中である。

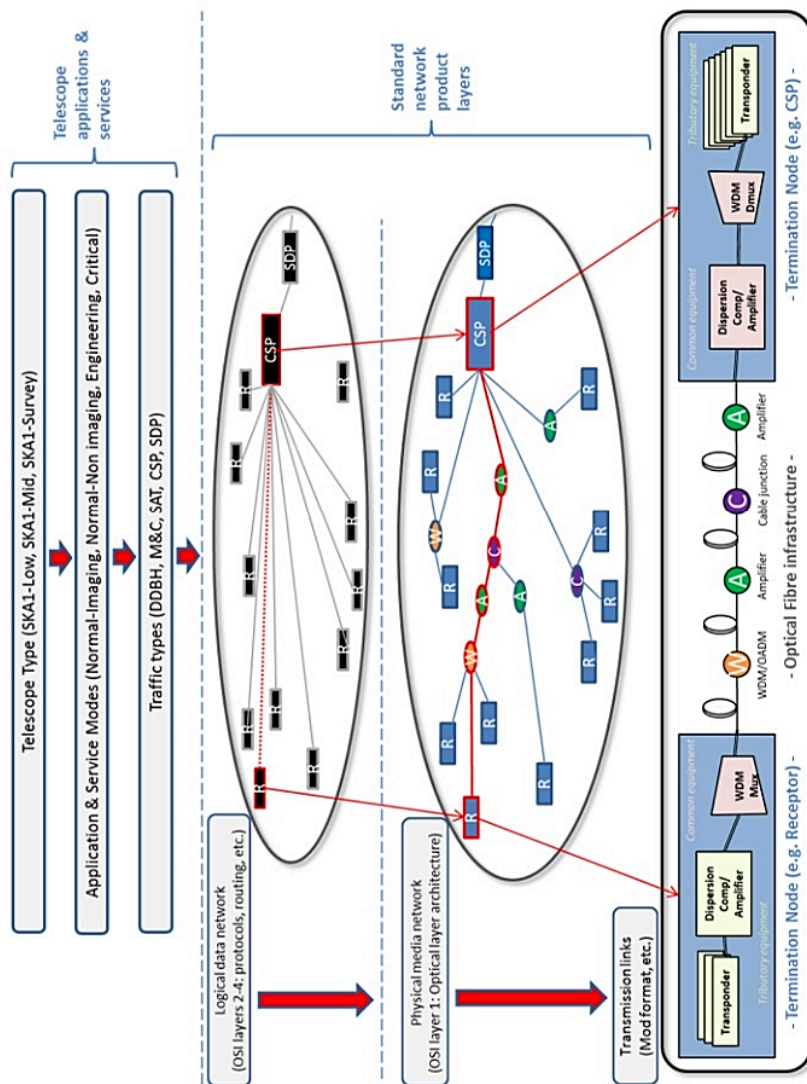


図 7.1 DDBH ネットワークヒエラルキー

### 7.3 SAT

SAT は観測所クロックといわれる 2 台以上の水素メーザのネットワークで構成される周波数標準と時刻標準を必要とする機器に分配する。機器のブロック図を図 7.2 に示す。SAT システムはファイバー伝送の経路長の変化の効果を補償するラウンドトリップ伝送を採用している。またラベルがつけられた時刻信号を分配し、デジタル装置に時刻情報を供給する。アンテナサイトにて必要

となる基準信号やサンプリングクロックなどは、SAT で供給された基準信号に同期してそれぞれ生成される。

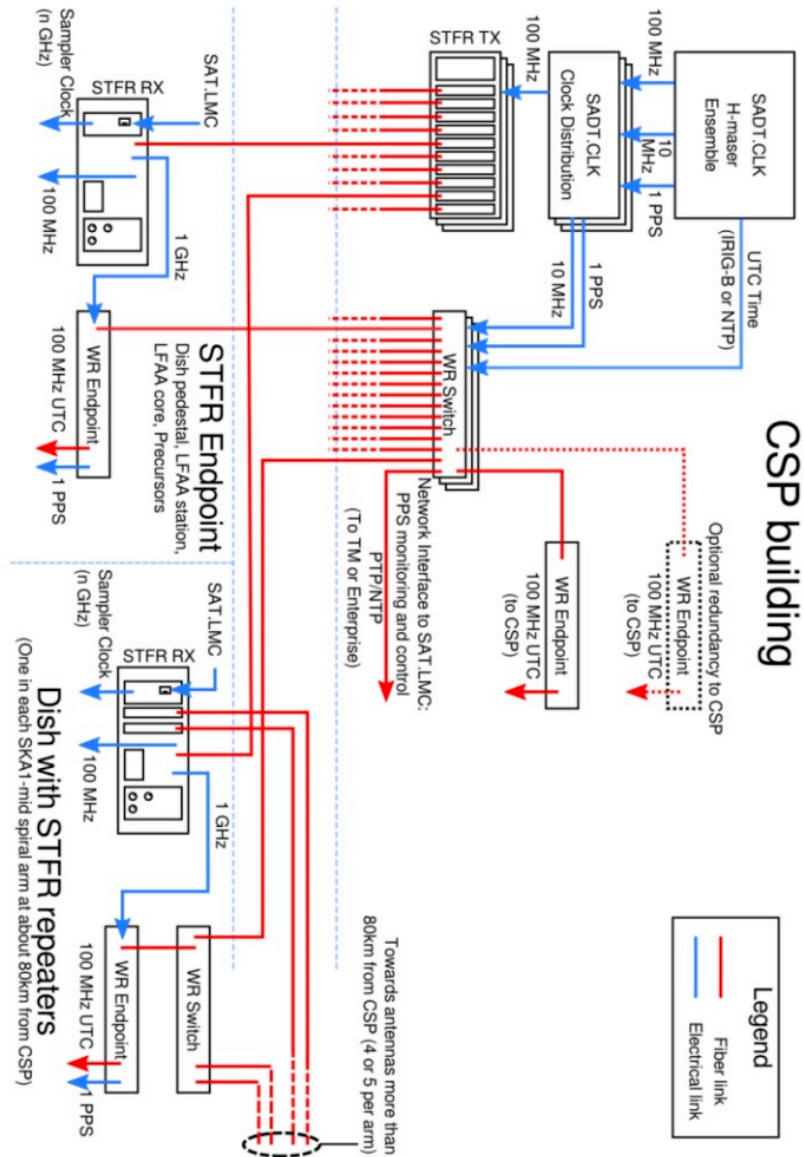


図 7.2 SAT ブロック図

## 7.4 SaDT の技術課題

SaDT の技術課題は、コスト、メンテナンス性、運用性・作業性が重要となる。また SKA2 では SKA1 に比べて 10 倍以上の伝送技術が必要となるため、これらの課題に加えて、大容量伝送性能が重要となる。日本国内には世界トップレベルのフォトニクス技術を持つメーカー、通信会

社等があり、これらの課題に新たな技術を導入することでソリューションを提供することが可能である。例えば多値コヒーレント伝送技術、DWDM 技術、低消費電力 WSS (Wavelength Selective Switch)、低損失光ファイバ製造技術などは特に SKA2 の大規模伝送技術において貢献が期待できる。

## 8 Central Signal Processor (CSP)

執筆: 河野裕介 (国立天文台), 今井裕 (鹿児島大学)

### 8.1 CSP 概要

CSP は SKA における信号処理の中心に位置づけられる一次処理装置であり、ビーム形成や相関処理を行う。入力は電波望遠鏡で受信され SADT によって伝送された信号である。処理されたデータは二次処理のため SDP に出力される。CSP の設備は MID、LOW でそれぞれ南アフリカの Carnarvon とオーストラリアの Murchison に建設される。

### 8.2 CSP コンソーシアム

12 カ国から 25 組織が参加している。SKA 参加国以外では米国、SKA への参加を検討している国からはスイス、ドイツ、スペインからの参加がある。主導組織はカナダの NRC で、WPC を主導するために MDA という企業とプロジェクトマネジメント及びエンジニアリングサービスについて契約を結んだ。主な参加民間企業では Cisco Systems (豪州)、IBM (スイス)、NVIDIA (豪州、インド) など計算機メーカーが名を連ねる。天文学研究機関だけでなく数理情報関係の研究機関も参加している。

### 8.3 CSP の基本機能

CSP は、主に Imaging と Non imaging 処理の 2 つの機能がある。加えてその 2 つの機能の制御を行う Local Monitor and Control (LMC) といわれる制御機能がある。LMC はアレイと同期して、アンテナから伝送されるデータをリアルタイムで複数のモジュールで並列演算を行うための制御を統括する。

SKA1-MID 及び LOW の機能図をそれぞれ図 8.1 及び 8.2 に示す。Imaging と Non imaging 処理について以下に述べる。

**Imaging 処理** Imaging 処理は Central Beam forming (CBF) と呼ばれる相関処理をさす。これは干渉計で行われる相互相関を通して視野が限定された電波画像をオフライン処理で合成するために必要な“ビジビリティ”(可視度) データを産出する。このためには、同一電波源からの電波が各望遠鏡では異なるタイミング(幾何学的遅延時間)で受信されること、また信号経路長や大気中透過時間には望遠鏡間で差があることなどを考慮した遅延追尾が必要で、処理する信号の時系列に時間差をつけるためのデータバッファが用いられる。この時間差の付け方を複数パターン計算して相関処理を行うと、そのパターンの数だけ視野を稼ぐことができる。また広い帯域の電波を分光処理することで線スペクトル分析のデータを供給することができる。

**Non Imaging 処理** Non imaging はパルサーサーチとパルサータイミングの2つからなる。パルサーサーチエンジンはMIDとLOWでそれぞれ300MHz、96MHzの帯域の信号から同時にそれぞれ1500本、500本のビームを合成する。ビーム合成は周波数ドメインで行われる。パルサータイミングエンジンは、MIDとLOWでそれぞれ最高2.5GHz、300MHzの帯域の信号から同時に16本のビームを合成する。ビーム合成は時間ドメインで行われる。

**コスト** SKA1のCSPに見込まれるコストは、総額で約90億円が見込まれている。その内訳は公開されていない。

## 8.4 開発状況

SKA1のCSPは、現存電波干渉計(JVLA, MWA, LOFAR, ASKAP, MeerKAT等)の関連処理、International Pulsar Timing ArrayにおけるPulsar Searchのノウハウに基づいて設計・開発が進められている。年間に約24億円の資金と130人分のフルタイム労働者を投入して開発が進められている。

## 8.5 CSPの技術課題

CSPの技術課題には以下のようなものがあげられる。

**プロセッサ** 現在最も可能性があるプロセッサは商用FPGAである。特に16nmから14nmプロセスのFPGAが演算性能と低消費電力性能の面で最も有望である。ASICも技術提案されているが、開発コストと開発リスクも含めたときにSKA1の規模では大きなアドバンテージを持っているとはいえない。また商用GPUは消費電力あたりの演算性能の面でFPGAに劣る面があるが、継続的な進化が行われていることが考慮され議論が継続されている。

**ファイバ** 高速伝送ファイバはプロセッサモジュールの相互接続のため重要なコンポーネントとなる。10Gbpsの伝送をユニットとすることが提案されている。また電氣的通信技術との比較もコストと複雑性を踏まえて行うことが重要となる。

**基板内伝送技術** 高密度化・高多層化プリント回路基板(HDI: High Density Interconnect)のような高速基板伝送技術がプロセッサボード等の実現では重要となる。

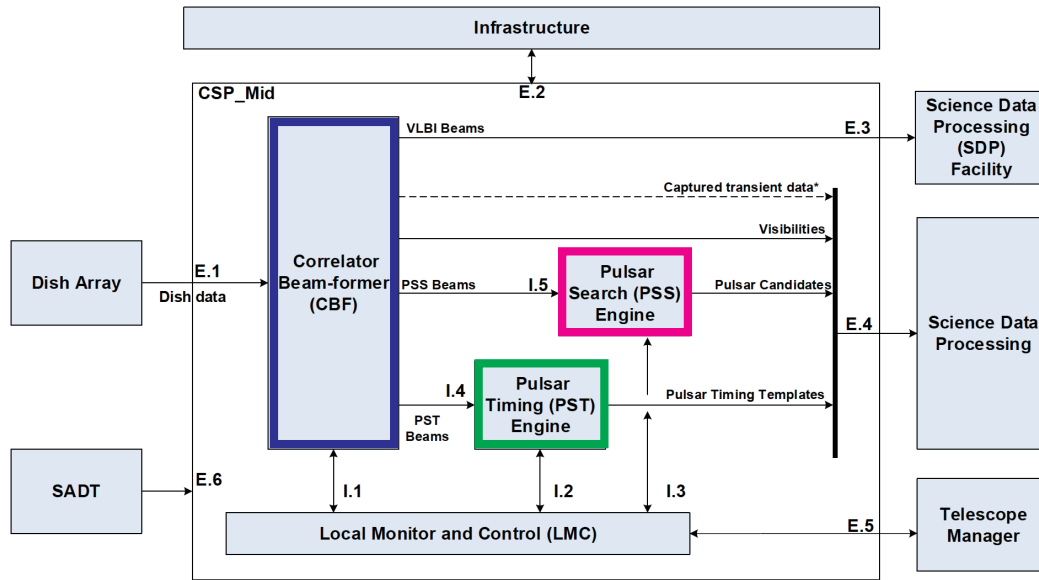
**排熱処理** 高速プロセッサの排熱はシステムの安定運用にとって重要である。SKA1では空冷や、水冷方式が検討されている。一方で現在世界中のデータセンターなどで用いられている高効率の冷却方式の導入も、大規模なSKA2では重要な技術課題となる。

**人工電波干渉(RFI)への対応** SKAの建設地は電波静穏指定地区になっておりRFIはかなり低いが、それでもなお飛行体からのものも含めてRFIが残留すると予想される。CSPでもRFI除去機能が重要となる。またアンテナに隣接しているCSP自体がRFIのソースとなりうるためRFIの発



生防止のためのシールドリングも必要となる。

**突発天体への対応** 星の爆発のような突発天体 (transients) を発見し分析するためには、受信信号そのものの情報が必要であるが、生データは容量が大きすぎるために永久保存ができない。従って、transients の検出の有無を即座に判断し、検出時間帯のみの情報を蓄えておく仕組みが必要となる。つまり、transient を検出したら一時的にデータを蓄えて SDP へそのデータを転送し、転送後に buffer を空にして次の transient 検出に備える、という流れを構築しなければならない。それを実現するデータバッファを Transient Buffer とよび、CSP 内で実装する必要がある。



\* ECP for FRB Transient Capture accepted but not finalised

図 8.1 SKA1-MID CSP の機能図とデータストリーム

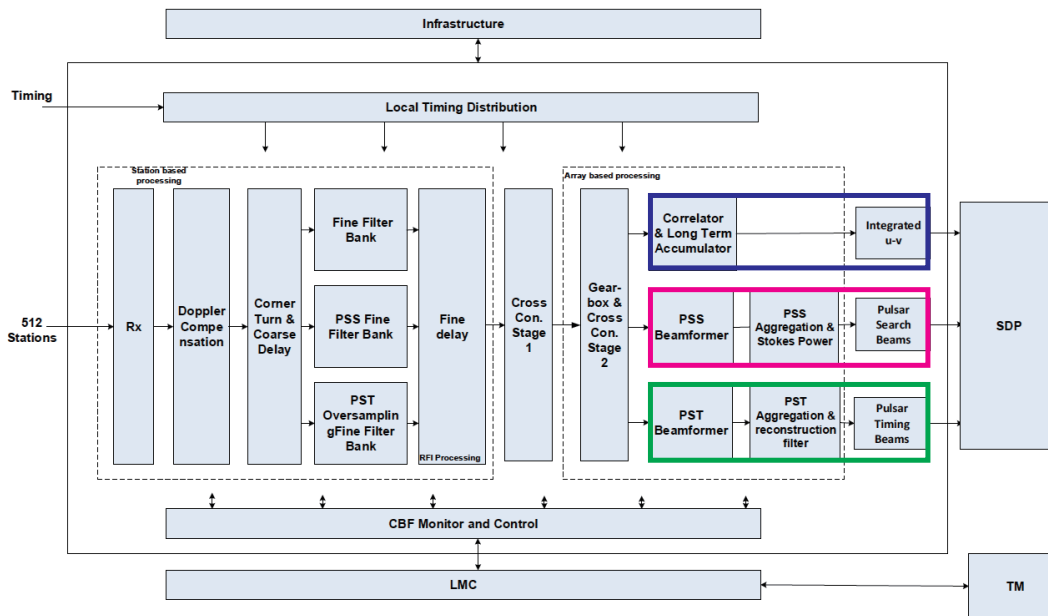


図 8.2 SKA1-LOW CSP の機能図とデータストリーム

## 9 Science Data Processor (SDP)

執筆: 赤堀卓也 (鹿児島大学)

### 9.1 SDP の概要

**SDP の役割** 図 9.1 には SDP の概念図を示す。SDP の役割は、まず CSP から提供される天体観測データと TM から提供される望遠鏡の稼働情報や各地の気象情報、そして運用者のコマンド情報を取り込み (ingesting)、確保 (buffering) することである。次にこれらのデータを組み合わせ、校正 (calibrating) と編集 (editing) を行うことである。具体的には機器由来の雑音の除去や大気の影響の除去などである。それから画像化 (imaging)、カタログ化 (cataloguing) の演算を行い、科学研究に用いるデータを作成する。具体的には、輝線データの結像とスペクトルの抽出、連続波データの結像、パルサーサーチ候補の最終的な選定、突発現象の検出、単一鏡運用としての intensity mapping、そして rotation measure mapping である。最後に、作成したデータの保存 (storage)、検索 (searching)、あるいは地域科学技術センターなどに通信 (communicating) することである。

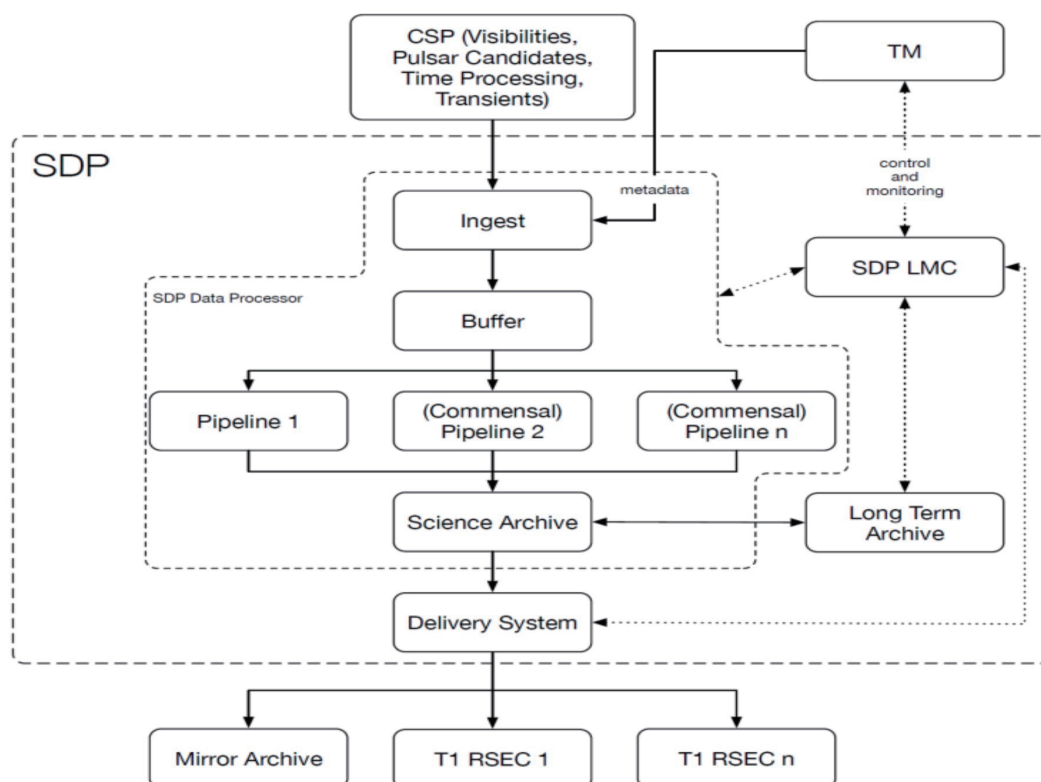


図 9.1 SDP の役割の概念図。LMC は Local Monitoring and Control, RSEC は Regional Science and Engineering Center の略である。

SDP コンソーシアム SDP の役割を達成するために、大きく分けてハードウェアとソフトウェアの開発が必要である。ハードウェアはいわゆるスパコンセンターが必要であり、ソフトウェアは AIPS や MIRIAD に代表される電波天文学のデータ解析アプリケーションが必要である。SDP コンソーシアムはこれらハードとソフトの両方の設計に携わる。SDP コンソーシアムは英国ケンブリッジ大学 Paul Alexander 教授を代表に世界 40 以上の大学・研究機関が参加する。IBM、Seagate、Intel、Nvidia、SGI、Cray、Oracle、Dell、Mellanox など IT 企業も名を連ねる。SKA メンバー国でないフランスやスペインの機関も、アソシエイトパートナーとして活動している。表 9.1 には 2015 年時点で判明しているメンバーをまとめる。

表 9.1 SDP コンソーシアム（順不同、2015 年時点で判明しているもの）

正規機関	カナダ大学共同体 (カナダ)	HPC センター (南アフリカ)
	中国大学共同体 (中国)	CSIRO (オーストラリア)
	JUELICH (ドイツ)	ICRAR (オーストラリア)
	iVEC (オーストラリア)	CADC (カナダ)
	ASTRON (オランダ)	STFC (イギリス)
	SKA 南アフリカ (南アフリカ)	マンチェスター大学 (イギリス)
	ケンブリッジ大学 (イギリス)	オックスフォード大学 (イギリス)
	サウスハンプトン大学 (イギリス)	
	ニュージーランド同盟 (ニュージーランド)	
	ビクトリア大学ウェリントン校 (ニュージーランド)	
	マックス・プランク研究所電波天文部門 MPiFR (ドイツ)	
連携機関	バルセロナスパコンセンター (スペイン)	パリ天文台 (フランス)
	ポルトガル SKA 共同体 (ポルトガル)	オルレアン大学 (フランス)
	UCL (イギリス)	
参加企業	IBM	Seagate Systems (UK)
	Intel	Nvidia
	SGI	Cray
	Oracle	
契約企業	Braan Consulting	Nvidia
	Dell	Mellanox
	Parallel Scientific	Calsoft

## 9.2 SDP の設計

ハードウェア 図 9.2 にはデータフローに沿ったハードウェアレイアウトの概念図を示す。CSP から来るデータレートは数 Tbps 級である。これは計画が具体化された時点での毎日の全世界のイン

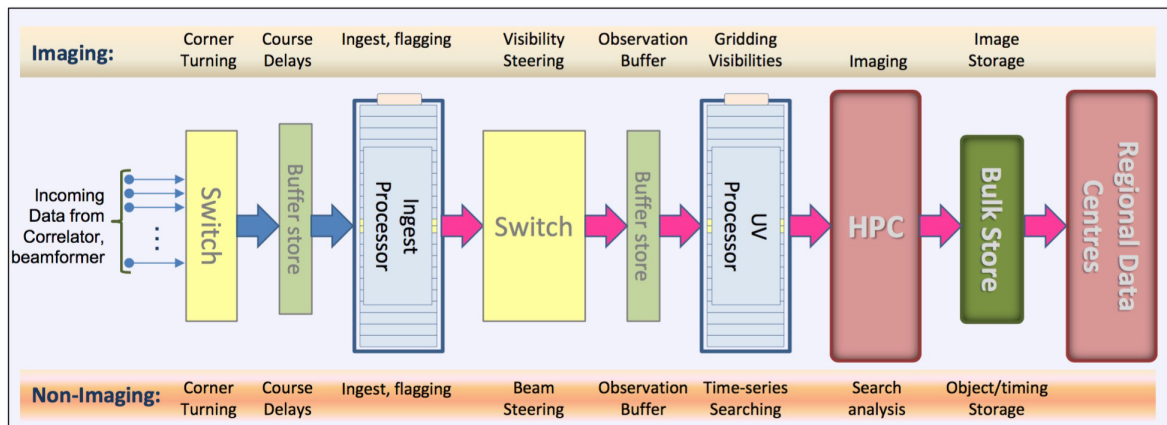


図 9.2 SDP のデータフローに沿ったハードウェアレイアウトの概念図。

ターネットのトラフィック量を上回り、2015 年時点での日本の総トラフィック量と同等である。そこで受信バッファを 2 つ用意し、データを一つに受信し続け、そのバッファにデータがあふれる前にもう一つのバッファでの演算を終わらせる。結果、日本の京コンピュータの 10 倍、2015 年時点での世界トップのスーパーコンピュータの処理速度に匹敵する 100 PFLOPs 級の処理速度が求められる。これを多数のラックで構成された大型並列計算機で処理する。1 つのラックは 20 のノードとスイッチなどから成り、ノードは 2 つの CPU に 2 つの加速器 (GPGPU や MIC)、共有メモリ、そして高速ストレージ (SSD やフラッシュ) が想定される。2020 年仕様でノードあたりのピーク演算性能は 120 TFLOPs、主メモリは 1TB 級、中間バッファは十数 TB、2 つの 56 Gbps インフィニバンドと 2 つの 10–40 Gbps イーサネットカードを想定する。これでノードあたりの最大電力を 1000 W 弱に抑え、スイッチ 200W 程度を加えて、ラック当たり 20 kW を目標にしている。データの保存はファイル管理システム (例えば Luster) を導入したラックが考えられている。ラック一つでおおよそ 1-30 PByte、20 kW 程度を想定する。電力制限はシビアな条件になっている。

**ハードウェアコスト** ハードウェアコストは現在の実売価格から 2020 年での調達価格を推定して見積もられている。まず中央演算処理装置は、PFLOPs あたり 10 万ユーロ (1500 万円) と試算している。ゆえにラック 1 台 (2.4 PFLOPs) あたりが 24 万ユーロ (3600 万円)、SDP 全体 (100 PFLOPs) では 1 千万ユーロ (15 億円) になる。次にアーカイブに使う HDD あるいは磁気テープは、TByte あたり 100 ユーロと試算している。運用 1 年間あたり (20 PByte) では 200 万ユーロ (3 億円) になる。最後に uv バッファに使う高性能不揮発性ストレージは、HDD の 10 倍程度と試算している。これは PByte あたり 100 万ユーロ (1.5 億円) になる。実はここが一番コスト高である。ゆえに、uv バッファ量に直結するアンテナ素子数や周波数チャンネル数が、SDP のコストに強く影響する。SDP のコスト 150 万ユーロ (300 億円) の半分はハードウェアコストである。

**ソフトウェア** まず OS の直上にコンパイラのラッパーを含む統一された開発・実行環境を置く(ベースツール)。ベースツールのほとんどは既製品のパッケージになるだろうが、一部は通信ミドルウェアのように SKA の SDP に特化し高速化したものが用いられるだろう。この層では、Oracle Database、MySQL、PostgreSQL のようなデータベース管理システムが必要とするツールもサポートする。ベースツールの上層には SKA ソフトに使われる本質的なサービスを置く(コアサービス)。ログイン制御、アンテナの状態監視、監視データアクセス、記録システム、警告システム、アンテナの座標などの施設データベースのバージョン制御、スケジューリングブロックサービスなどが含まれる。コアサービスの上層には実装ツールを置く。実装ツールは、GUI を開発するための API やツールを提供したり、GUI でログにアクセスできるウィジェットを提供する。またランタイムの管理画面や、標準プログラミング言語のサポートも提供する。

**ソフトウェアコスト** ALMA では設備投資を除いた主要なコンピューティングのための経費は 5000 万ドルだったそうである。ゆえに SKA ソフトも 5000 万ユーロ程度と大雑把に見積もっている。あるいは 10 万ユーロ(1500 万円)を FTE として雇用に投じて、年 100 FTEs で 4 年間のソフト開発をすると 4000 万ユーロ(60 億円)となるので概ねその程度を想定している。

## 9.3 SDP の課題

### 9.3.1 現在の設計における不安要素

**理論ピーク性能** 産業界の 2021 年までのロードマップを参考に、2020 年までは 24 ヶ月で 10 倍、2020 年からは保守的に 36 ヶ月で 10 倍として積算している。しかしこの推定はリスクであろう。CPU と加速器(GPU など)の成長率は異なることに注意がいるし、理論ピーク性能と実際のアプリケーションの処理能力は必ずしも比例しない。

**並列化** 基本コンセプトは 64k の周波数チャンネルを並列処理するというものなので、周波数間で通信する特殊な場合を除けば完全に並列性がある。処理はキューイングシステムによりベストエフォートで処理されるだろう。スケジューリングに大きな懸念も想定されない。以上から、64k よりも十分少ない演算ユニットを想定している限り、並列化効率は十分見込めるだろう。

**実行効率** 並列効率が高いのであれば、システム全体の演算性能は各ノードでの理論ピーク性能に対する実行効率が鍵となる。計算ノードの理論ピーク性能は加速器に頼っているため、加速器での実行効率が性能を決定するだろう。執筆者が得ている情報によれば、作業仮説として実行効率 25% を仮定している。これは挑戦的と言わざるを得ない。事実、演算処理のホットスポットであるキーカーネル(格子分割とフーリエ変換)の 2015 年時点での達成値は 8-16% という情報があり、さらなる高速化・最適化が課題である。一方で、この実行効率のボトルネックはメモリ帯域幅であるとわかっている。従って、次世代のプロセッサで帯域が拡大されれば、実行効率は大幅に改善されると希望的に観測する意見もある。

**ビックデータの準リアルタイム処理** CSP の数 Tbps 級の UV データを 2 つのバッファと 100 PFLOPs 級の演算器で対処するのは、要素技術では実例があるとはいえ、限りある予算の中で持続可能な施設で実現するのは挑戦的であろう。高信頼性、低コスト、低消費電力の機器が求められる。ノード間の通信トポロジーについての記述は乏しく、検討されているか定かではない。uv データをすべて保存するのはコスト的に全く現実的ではないため、SDP では uv データを残さないという大きな選択をする。これは生データが消失するまでに準リアルタイム処理を完結しなければならないことを意味する。時間的猶予は、観測プロジェクトの時間単位と SDP リソース (つまり予算) に依存する。現在の作業仮説では観測プロジェクトの時間単位を 6-8 時間とするので、uv データは少なくともその時間はバッファに残ると思われる。

**半自動ながら堅牢な解析アルゴリズム** 準リアルタイム処理の制約にビックデータの制約も合わせると、データ処理を人の判断を待たずに (半自動で) データパイプラインに送る必要が出てくる。それでいて SKA に要求される高感度と高ダイナミックレンジを達成するために、高度な電波周波数障害 (RFI) の軽減が要求され、その判断をほぼリアルタイムで行わなければならない。これは従来の大型望遠鏡にはない挑戦となるだろう。高度な較正と結像のアルゴリズムを採用することになるが、そこには TM から提供される情報の考慮そして解析パラメータセットの選択が決定的な成分となり、これも半自動的に準リアルタイムで判断しなければならない。つまり SDP は、単にシステムとして巨大なだけでなく、非常に知的なシステムでなければならない。自動化は 24 時間監視観測を行うような小型望遠鏡のノウハウが活きるかもしれない、また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も役立つかもしれない。

**拡張性のあるシステム** SDP の演算パイプラインはハードウェアと OS の特性に最適化した SKA ソフトからなるだけでなく、開発コスト低減の観点から、第三者機関のソフトウェアを可能な限り盛り込むべきである。その可能性を広げるために、システムは国際的な規格に準拠した言語やインターフェイスを採用し、汎用性と拡張性のあるものにする必要がある。

**地域科学技術センター** 地域科学技術センターへのデータの配布と解析ソフトの提供は建設のコストに盛り込まれている。ところが、その先での管理運用はコスト外のため、地域科学技術センターで前提としている処理は資金的に約束されているわけではない。そもそも地域科学技術センターでこういった科学データ処理を想定するのか定まっていない。

**SKA2 への挑戦** 最後に、単純にスケールが 10 倍になると想定した場合にどのような課題があるだろうか。ハードウェアでは、実行効率を高めて効率化を図るために、演算器とメモリとの間のスループット (バンド幅) を改善することが課題となる。しかしベクトル計算機が衰退していったように、コストとのトレードオフとなるだろう。ソフトウェアでは、ソフトウェアのあらゆる層において演算処理のイノベーションがあればコストダウンを図ることができるだろう。そして大幅なコストダウンにつながる部分は、演算処理のホットスポットである格子分割とフーリエ変換である。

### 9.3.2 日本の可能な貢献

宇宙磁場解析パイプラインの開発 波長  $\lambda$  に対する複素偏波強度  $P(\lambda^2) = Q(\lambda^2) + iU(\lambda^2)$  のフーリエ変換にあたる関数（ファラデースペクトル）は磁場の視線情報を再構成する。しかし有限で離散データの変換である以上、再構成は不完全である。そこでこの再構成の精度を向上させる試みが世界中で進められており、我が国でも自動処理・自動判別のパイプラインを想定して開発に乗り出している [19, 22, 20, 21, 24, 23]。精度向上の一つの方法は RM clean と呼ばれる電波干渉計のイメージングに類似した手法である。これはファラデースペクトルを無数の光源と捉え、サイドローブを伴うそれぞれの光源をガウシアンによって再構成する。ところが、この方法ではありもしない偽シグナルを合成することが知られていて、それがどのような状況で発生するか [22] や、Clean 後のファラデースペクトルの信頼性 [23] が研究されている。もうひとつの方法はモデルフィットである。ファラデースペクトルのモデルをフーリエ変換した  $P(\lambda^2)$  と観測データを比べ、再現性を統計的に評価する。日本のトモグラフィー研究開発班は、豪州の SKA 試験機 ASKAP の POSSUM と呼ばれる偏波サーベイ計画のデータ処理パイプラインの末端に、メトロポリス・ヘイスティング法の MCMC をベースとした QU-fit のモデル推定プログラムを開発し実装された。今後は、MCMC の収束性を確かにすることや、ベストな推定を見誤るケースに対処していくこと、より高度なモデル推定法としてレプリカ交換や圧縮センシングを適用する。また RM Clean と比べて、モデル推定は計算が重たい。プログラムの並列化や最適化による高速化も課題である。

宇宙再電離データ較正法 宇宙再電離の研究では、アンテナ感度は理論的に予想されるシグナル強度に到達する見込みだが、シグナルの他に銀河系や系外電波天体などの前景放射や人工電波が存在し、その強さはシグナルよりもはるかに強い。したがってこれらを精密に除去することがシグナルを検出する上で決定的である。SKA は人の手を介さずにほぼ実時間で上記の処理が必要になるため、知的なアルゴリズムの開発が不可欠となる。混合モデルや階層ベイズモデルといった統計数理的手法を用いて除去する方法を開発する構想がある。また、熊本大学のグループは MWA の EoR 研究グループと共同で、ドリフトスキャン方式での観測の方法論の開発に着手した。ドリフトスキャンは観測戦略に制限がある一方で、ビームを天頂に向けもっとも好条件で受信できる利点がある。宇宙再電離の研究ではビームパターンも極めて精度良く取り除く必要があるため、ドリフトスキャンはその解のひとつとして注目すべきアイデアといえるだろう。

スパースモデリングを使った画像処理 SKA がかつてないほど多数のアンテナにより干渉計を成すために、画像の品質が大幅に改善される。ゆえに画像を用いた研究の進展が期待される。一方で、最大基線長により角度分解能は制限される。そこで、角度分解能を超える超解像を実現するため、スパースモデリングの手法を用いた結像パイプラインを提案・開発する構想がある。スパースモデリングを用いることで、従来よりも質の高い画像を得ることが可能になるかもしれない。



## 付録A SKA1 Level 0 Science Requirements

表 A.1 SKA1 の科学目標を達成するための要求。Level 0 Science Requirements [2] 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 $\mu$ Jy/Beam @ 145 arcsec Cont	30 dB	25 dB
			SKA1-MID	SPF1	Non-Imaging	650 - 950 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	13 $\mu$ Jy/Beam @ 65 arcsec Cont	30 dB	25 dB
			SKA1-MID	SPF2	Non-Imaging	1250 - 1550 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	7 $\mu$ 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 $\mu$ Jy/Beam @ 8 arcsec Cont	30 dB	40 dB
			SKA1-MID	SPF2	Non-Imaging	950 - 1760 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	3 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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
LO 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.2 SKA1 の科学目標を達成するためのサーバイストラテジー。Level 0 Science Requirements [2] より引用。

Science Objective	SWG	High Priority Science Objective Number	SKA1 Component	Band	Mode	Frequency			Sensitivity		
						Range Low - High	Resolution Initial:Cat: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 $\mu$ Jy/Beam @ 145 arcsec Cont	30 dB	25 dB
			SKA1-MID	SPF1	Non-Imaging	650 - 950 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	13 $\mu$ Jy/Beam @ 65 arcsec Cont	30 dB	25 dB
			SKA1-MID	SPF2	Non-Imaging	1250 - 1550 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	7 $\mu$ 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 $\mu$ Jy/Beam @ 8 arcsec Cont	30 dB	40 dB
			SKA1-MID	SPF2	Non-Imaging	950 - 1760 MHz	20:20:75 kHz	30 dB	3 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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

## 付録B 電波天文観測の基礎

執筆: 青木貴弘 (山口大学)

### B.1 電波望遠鏡の感度

電波観測における雑音レベルは雑音指数や雑音温度として表され、熱雑音のほとんどは視線上の大気、地面からの漏れこみ、受信機に起因する。それら全てを合わせたシステムとしての雑音温度をシステム雑音温度  $T_{\text{sys}}$  とよび、この値が小さいほど電波望遠鏡としての感度が良い。

この  $T_{\text{sys}}$  を用いて電波望遠鏡の最小検出フラックス密度  $S_{\text{min}}$  が求まり、一偏波あたり、

$$S_{\text{min}} = \frac{SEFD}{\eta_s \sqrt{\Delta\nu \Delta t}}, \quad SEFD = \frac{2k_B T_{\text{sys}}}{A_e} \quad (\text{B.1})$$

で与えられる [51]。両偏波観測の場合には  $S_{\text{min}} = SEFD / (\eta_s \sqrt{2\Delta\nu \Delta t})$  となり、片偏波観測に比べて感度は  $\sqrt{2}$  倍良くなる。ここで  $SEFD$  は system equivalent flux density の略であり、雑音温度  $T_{\text{sys}}$  を電波強度に換算した量である。また  $\eta_s$  はシステム効率を表し典型値は 0.9 程度、 $\Delta\nu$  は観測帯域幅、 $\Delta t$  はデータの積分時間、 $k_B$  はボルツマン定数、 $A_e$  はアンテナの有効開口面積である。SKA においては、感度パラメータとして  $SEFD$  の逆数に相当する  $A_e/T_{\text{sys}}$  を採用し\*5、 $A_e$  には全てのアンテナによる全集光面積を用いており、この値の大きさを感度の良さを示している。

### B.2 集光面積と視野のトレードオフ関係

放射のポインティングベクトルの大きさが  $S$  の場に置かれたアンテナの受信電力が  $P$  のとき、そのアンテナの有効開口面積、つまり集光面積は  $A_e = P/S$  で与えられる。アンテナで送受信\*6する波長を  $\lambda$  とすると、アンテナが放射するビームの全立体角  $\Omega_A$  と有効開口面積  $A_e$  の間には

$$A_e \Omega_A = \lambda^2 \quad (\text{B.2})$$

という関係が成り立つ。これらの量を用いて、アンテナの指向性  $D$  と利得  $G$  は

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}, \quad G = \eta_g D \quad (\text{B.3})$$

で与えられる。ここで  $\eta_g (\leq 1)$  はアンテナの鏡面誤差損失などによる効率を表す。このようにアンテナの利得  $G$  と集光面積  $A_e$  は比例関係にあり、全ビーム立体角  $\Omega_A$  とは反比例の関係にある。アンテナの視野  $\Omega_{\text{FoV}}$  は全ビーム立体角  $\Omega_A$  に比例するため、視野  $\Omega_{\text{FoV}}$  と集光面積  $A_e$  は反比例し、トレードオフの関係にある。SKA-MID のコンセプトは広視野と高感度であり、視野角を稼ぐ

\*5 ここでいう感度パラメータ  $A/T$  は通信分野一般に使われる  $G/T$  (GT 比) に相当する量である。

\*6 アンテナの送信特性と受信特性は同じであり、相反定理 (可逆定理) を満たす。

ために口径の小さい望遠鏡を使用し\*7、それによる集光面積の小ささをアンテナの台数でカバーしている。

### B.3 サーベイスピード

サーベイスピード (survey speed) とはその名の通り天体の探査速度を表し、この値が大きいほど天体の探査効率が高く、例えば突発天体を数多く発見できたり、天体の光度変動を追跡しやすくなる。つまりサーベイスピードは「時間領域天文学」にとって最も重要な観測パラメータであり、次のように定義される。ただしここでは、望遠鏡の感度パターンや掃天方法を単純化して考える。

空の探査範囲を立体角  $\Omega_{\text{survey}}$  とし、その範囲を観測し終えるのに時間  $T_{\text{survey}}$  だけかかるとすると、そのサーベイスピード  $SS$  は

$$SS = \Omega_{\text{survey}}/T_{\text{survey}} \quad (\text{B.4})$$

で定義され、単位は  $\text{deg}^2/\text{s}$  である (立体角の単位を  $\text{deg}^2$  とした)。ここで単純化のためサブアレイや PAF によるビーム数などは考えないことにすると、望遠鏡による瞬時的な観測範囲は視野角  $\Omega_{\text{FoV}}$  に一致する。また掃天方法として、ある方向を時間  $\Delta t$  だけ観測し続けてそのデータを積分し、次に観測方向をずらしてまた時間  $\Delta t$  だけ観測する、という簡単な方法を採用することになると、これらの量の間には

$$SS = \Omega_{\text{survey}}/T_{\text{survey}} = \Omega_{\text{FoV}}/\Delta t \quad (\text{B.5})$$

という簡単な関係が成り立つ。ここで式 (B.1) より、積分時間  $\Delta t$  は

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta \nu} \left( \frac{SEFD}{S_{\text{min}}} \right)^2 = \frac{4k_{\text{B}}^2}{S_{\text{min}}^2 \Delta \nu} \left( \frac{T_{\text{sys}}}{A_{\text{e}}} \right)^2 \quad (\text{B.6})$$

と表せる (ただし効率  $\eta_{\text{s}}$  は省略した)。したがって片偏波観測でのサーベイスピードは

$$SS = \frac{S_{\text{min}}^2 \Delta \nu}{4k_{\text{B}}^2} \times SSFoM, \quad SSFoM = \Omega_{\text{FoV}} \left( \frac{A_{\text{e}}}{T_{\text{sys}}} \right)^2 \quad (\text{B.7})$$

と与えられる。ここで  $SSFoM$  は survey speed figure of merit の略であり、通常は上記の  $SS$  ではなく、 $SSFoM$  をサーベイスピードと呼ぶことが多い。サーベイスピード  $SSFoM$  の単位は  $\text{deg}^2 \text{m}^4/\text{K}^2$  である。

\*7 アンテナの視野  $\Omega_{\text{FoV}}$  はビームの半値全幅  $\theta_{\text{HP}}$  を用いて  $\Omega_{\text{FoV}} = 2\pi[1 - \cos(\theta_{\text{HP}}/2)] \simeq (\pi/4)\theta_{\text{HP}}^2$  で与えられ、またパラボラアンテナのような円形開口の場合、開口の直径を  $D$ 、送受信波長を  $\lambda$  とすると、ビーム幅は  $\theta_{\text{HP}} \simeq 1.2\lambda/D$  で与えられる。つまり単一のパラボラアンテナの視野は  $\Omega_{\text{FoV}} \simeq 1.1(\lambda/D)^2$  となり、口径  $D$  の 2 乗つまり開口面積に反比例する。

## 参照文献

- [1] SKA web page: <https://www.skatelescope.org/>
- [2] SKA1 Level 0 Science Requirements:  
[https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2014/03/SKA-TEL-SKO-0000007\\_SKA1\\_Level\\_0\\_Science\\_RequirementsRev02-part-1-signed.pdf](https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2014/03/SKA-TEL-SKO-0000007_SKA1_Level_0_Science_RequirementsRev02-part-1-signed.pdf)
- [3] SKA1 Level 1 System Requirements:  
[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](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)
- [4] SKA1 System Baseline Design version 1:  
[https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2014/11/SKA-TEL-SKO-0000002-AG-BD-DD-Rev01-SKA1\\_System\\_Baseline\\_Design.pdf](https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2014/11/SKA-TEL-SKO-0000002-AG-BD-DD-Rev01-SKA1_System_Baseline_Design.pdf)
- [5] SKA1 System Baseline Design version 2:  
[https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2014/03/SKA-TEL-SKO-0000308\\_SKA1\\_System\\_Baseline\\_v2\\_DescriptionRev01-part-1-signed.pdf](https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2014/03/SKA-TEL-SKO-0000308_SKA1_System_Baseline_v2_DescriptionRev01-part-1-signed.pdf)
- [6] 2015 SKA Engineering Meeting 講演スライド:  
<https://indico.skatelescope.org/event/362/material/slides/>
- [7] 2016 SKA Engineering Meeting 講演スライド:  
<https://indico.skatelescope.org/event/402/page/9>
- [8] LFAA Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/AADC-TEL.LFAA\\_.SE\\_.MGT-AADC-PL-002-Technical-Description.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/AADC-TEL.LFAA_.SE_.MGT-AADC-PL-002-Technical-Description.pdf)
- [9] MFAA Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/AAMID-TEL.MFAA\\_.SE\\_.MGT-AAMID-PL-002-Technical-Description.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/AAMID-TEL.MFAA_.SE_.MGT-AAMID-PL-002-Technical-Description.pdf)
- [10] DISH Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL\\_DSH\\_MGT-CSIRO-TS-004-1\\_DishTechSol.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL_DSH_MGT-CSIRO-TS-004-1_DishTechSol.pdf)
- [11] WBSPF Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/WBSPF-RfP-04-Technical-Solution\\_online.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/WBSPF-RfP-04-Technical-Solution_online.pdf)
- [12] SaDT Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL-SADT-PROP\\_TECH-001\\_Redacted\\_final\\_24Sept13.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL-SADT-PROP_TECH-001_Redacted_final_24Sept13.pdf)
- [13] CSP Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/CSP\\_Technical\\_Description.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/CSP_Technical_Description.pdf)
- [14] SDP Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SDP-PROP-DR-001-1\\_ElemConc.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SDP-PROP-DR-001-1_ElemConc.pdf)
- [15] AIV Technical Document:

- [http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL.AIV\\_.MGT-NRF-TD-001-1\\_AivTechDescr.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL.AIV_.MGT-NRF-TD-001-1_AivTechDescr.pdf)
- [16] INFRA-AUS Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA.TEL\\_.INFRA\\_Australia\\_INFRA\\_AUS\\_Consortium\\_Technical\\_Description.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA.TEL_.INFRA_Australia_INFRA_AUS_Consortium_Technical_Description.pdf)
- [17] INFRA-SA Technical Document:  
[http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL-INFRA-SA-SE-TD-001-Rev-1\\_final.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL-INFRA-SA-SE-TD-001-Rev-1_final.pdf)
- [18] TM Technical Document:  
<http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/SKA-TEL.MGR-TMC-TECHDESC-001-1.pdf>
- [19] T. Akahori, K. Kumazaki, K. Takahashi, D. Ryu (2014), PASJ, 66, 65
- [20] S. Ideguchi, K. Takahashi, T. Akahori, K. Kumazaki, D. Ryu (2014), PASJ, 66, 5
- [21] S. Ideguchi, Y. Tashiro, T. Akahori, K. Takahashi, D. Ryu (2014), ApJ, 792, 51
- [22] K. Kumazaki, T. Akahori, S. Ideguchi, T. Kurayama, K. Takahashi (2014), PASJ, 66, 61
- [23] Y. Miyashita, S. Ideguchi, K. Takahashi, (2016), PASJ, 68, 44
- [24] T. Ozawa, H. Nakanishi, T. Akahori, et al. (2015), PASJ, 67, 110
- [25] X. H. Sun, L. Rudnick, T. Akahori, et al. 2015, AJ, 149, 60
- [26] Christophe Caloz, Atsushi Sanada, and Tatsuo Itoh, A Novel Composite Right-/Left-Handed Coupled-Line Directional Coupler With Arbitrary Coupling Level and Broad Bandwidth, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 52, NO. 3, pp.980-992, MARCH 2004
- [27] B. Veidt, T. Burgess, R. Messing, G. Hovey and R. Smegal, 2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Sciences Meeting, 2009
- [28] Stuart G. Hay, John, D. O' Sullivan, and Raj Mittra, Connected Patch Array Analysis Using the Characteristic Basis Function Method, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 59, NO. 6, pp.1828-1837, JUNE 2011
- [29] Jonathan C. Landon, Development of an Experimental Phased Array Feed System and Algorithms for Radio Astronomy, Doctor Thesis, Brigham Young University, August 2011
- [30] D. Anish Roshi, Karl F. Warnick, Joe Brandt, J. Richard Fisher, Pam Ford, Brian D. Jeffs, Paul Marganian, Morgan McLeod, Melinda Mello, Matthew Morgan, Roger Norrod, William Shillue, Robert Simon and Steven White, A 19 element Cryogenic Phased Array Feed for the Green Bank Telescope, IEEE AP-S, pp. 1376-1377, 2015
- [31] Yang Wu, Karl F. Warnick, and Chengjin Jin, Design Study of an L-Band Phased Array Feed for Wide-Field Surveys and Vibration Compensation on FAST, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 61, NO. 6, pp. 3026-3033, JUNE 2013
- [32] A. P. Chippendale, D. McConnell, K. Bannister, N. Nikolic, A. W. Hotan, K. W. Smart, R. D. Shaw, D. B. Hayman, and S. G. Hay, Recent Developments in Measuring Signal and Noise in Phased Array Feeds at CSIRO, 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5, 2016 (<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7474317>)
- [33] A. P. Chippendale, A. J. Brown, R. J. Beresford, G. A. Hampson, R. D. Shaw, D. B. Hayman, A. Macleod, A. R. Forsyth, S. G. Hay, M. Leach, C. Cantrall, M. L. Brothers and A. W. Hotan, Measured Aperture-Array Noise Temperature of the Mark II Phased Array Feed for ASKAP, 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-4, 2015 (<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7442673>)
- [34] Stephen Smith and Sander Weinreb, A Cryogenic, Wide Band Receiver for the 500 m Aperature Spherical

- Telescope (FAST), The IEEE Microwave Theory and Techniques Society's 2017 International Microwave Symposium (IMS2017), 4-9 June 2017
- [35] William T. Whistler, The Microstrip Dual-Layer Folded Dipole as a phased array element, IEEE Conference Publication, Volume 25, pp.1024 - 1027, 1987, DOI: 10.1109/APS.1987.1149956
- [36] Ben Muukm Robert Taylor, Tim Durham, William Crosswell, Brett Pigon, Randy Boozer, Stephen Brown, Mark Jones, Jonathan Pryor, Sean Ortiz, Jim Rawnic, Keith Krebs, Mark Vanstrum, Griffin Gothard, and Don Wiebelt, A Low-Profile Broadband Phased Array Antenna, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest, vol.2, pp. 448-451, 2003
- [37] Krzysztof Wincza, Slawomir Gruszczynski, Artur Rydosz, Izabela Slomian, Octave-Band Aperture-Stacked Microstrip Antenna Element for Wideband Antenna Arrays, 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), 1579-1580, 2016, DOI: 10.1109/APS.2016.7696496
- [38] Hans Steyskal, On the Merit of Asymmetric Phased Array Elements, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 61, NO. 7, pp. 3519-3524, JULY 2013
- [39] Guang-Hua Sun, Sai-Wai Wong, Qi-Kai Huang, Lei Zhu, and Qing-Xin Chu, G.H. Sun, S.W. Wong, Q.K. Huang, and Q.X. Chu, A Novel Wideband Grid Array Antenna with Vertical Radiation Elements, 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), vol. 3, pp. 1-3, 2015, DOI: 10.1109/APMC.2015.7413311
- [40] Johnson J. H. Wang, Low-cost Broadband Planar Travelling-Wave Arrays (TWA) with 2-D elements, 2010 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, PP. 612 - 615, DOI: 10.1109/ICEAA.2010.5652289
- [41] L. Pazin and Y. Leviatan, Design of a radial waveguide feed network for a pin-fed array antenna, IEEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 153, Issue 1, PP. 38-42, 2006, DOI: 10.1049/ip-map:20050066
- [42] Achilles Boursianis, Antonis Dimitriou, Aggelos Bletsas and John N. Sahalos, A Wideband UHF RFID Reader Antenna Array with Bow-tie Elements, 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-4, 2016, DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481912
- [43] Md. Faruk Hasan, Md. Ariful Islam, A Miniaturization of the Quasi-Self-Complementary Antenna With a Wearable Leather Substrate and the Use of Specific Ultra-Wide-Band Frequency Range for On-Body Communications, [IEEE/OSA/ICAP International Conference on Informatics, Electronics & Vision, PP. 28 - 33, DOI: 10.1109/ICIEV.2012.6317536, 2012
- [44] Xu Zhang, Huiping Guo, Xueguan Liu, Hanzhi Hu, A Broadband Self-complementary Printed Antenna with Axe Shape, Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, PP. 267 - 270, DOI: 10.1109/ISAPE.2010.5696450, 2010
- [45] Yasuto Mushiaki, Self-Complementary Antenna, IEEE Antennas & Propagation Magazine, vol. 34, Issue 6, pp. 23-29, 1992
- [46] Hui Chu, Yong-Xin Guo, Hang Wong, and Xiangquan Shi, Wideband Self-Complementary Quasi-Yagi Antenna for Millimeter-Wave Systems, IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 10, PP. 322-325, 2011
- [47] Eiji Kawai, Junichi Nakajima, Hiroshi Takeuchi, Hiromitsu Kuboki, Tetsuro Kondo, Masanobu Suzuki and Kenshi Saito, RFI Mitigation at a 2 GHz Band by Using a Wide-band High-temperature Superconductor Filter, Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol. 54, No. 1, pp. 31- 37, 2008
- [48] Hiroyuki Kayano, Noritsugu Shiokawa, Kohei Nakayama, and Tamio Kawaguchi, Low-Profile High-Sensitivity Sub-array Module with HTS Filters for an Active Phased Array Antenna, 2014 IEEE Radar Conference, Pages: 0118 - 0121, DOI: 10.1109/RADAR.2014.6875567
- [49] Tsuyoshi Kumamoto, Hiroyuki Kayano, Noritsugu Shiokawa, Kohei Nakayama, Tamio Kawaguchi, and Mitsuyoshi Shinonaga, High-Sensitivity Receiving Sub-array Module with HTS Filters for an Active Phased

- 
- Array Antenna, 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, PP. 341 - 345, DOI: 10.1109/ARRAY.2013.6731852
- [50] Green Bank Observatory Proposer's Guide for the Green Bank Telescope, January 30, 2017
- [51] T.L. Wilson, K. Rohlfs, S.Hüttemeister, Eds., "Signal Processing and Receivers: Theory" in *Tools of Radio Astronomy* (Springer, ed. 5, 2008), chap. 4, pp.68-69.



製作 日本 SKA コンソーシアム

2017 年 第 2 版