



论文

SKA区域中心数据处理系统和科学应用专题

面向SKA1时代的科学数据流及阵列模拟分析

郭绍光^{1,2*}, 陆扬¹, 安涛¹, 劳保强^{1,3}, 徐志骏¹, 伍筱聪¹, 吕唯佳¹

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 云南大学物理与天文学院, 昆明 650500

*联系人, E-mail: sgguo@shao.ac.cn

收稿日期: 2022-06-29; 接受日期: 2022-08-31; 网络出版日期: 2022-12-15

SKA专项(编号: 2020SKA0110300)、国家重点研发计划(编号: 2018YFA0404603)、国家自然科学基金(编号: 11873079, 12041301)和中国科学院青年创新促进会项目(编号: 2021258)资助

摘要 作为下一代射电望远镜, 平方公里阵列望远镜(Square Kilometre Array, SKA)经过多年的筹备, 第一阶段(SK Phase 1, SKA1)已经在2021年7月开工建设, SKA1正式运行后预计每年将产生710 PB的科学归档数据, 这些数据将存储在世界各地的SKA区域中心供科研工作者使用. 本文将SKA观测台站、中央信号处理器、科学数据处理及区域中心等各个阶段的模型进行量化分析, 以SKA1的高优先级科学观测为主要依据, 得出每个阶段的数据流评估情况, 以及对科学数据处理算力的需求. 以当前SKA1-low和SKA1-mid的阵列为例, 总结了包括分辨率、灵敏度和UV (Ultraviolet)覆盖等影响干涉阵列布局的关键因素; 最后使用OSKAR (Oxford SKA Radio Telescope Simulator)进行干涉阵列的数据模拟, 通过对SKA1-mid的模拟得出系统的可扩展性和稳定性, 通过对SKA1-low在CSRC-P上的模拟, 可以看出中国SKA区域中心原型机设计经过了充分的论证和优化, 并得出了详细的算力需求以及数据量的详细信息. SKA对数据处理、计算和存储等的需求, 将需要电子、通信、信息、计算机等技术和交叉学科的联合推动.

关键词 平方公里阵列, 数据模拟, 综合孔径, 数据格式**PACS:** 07.05.Bx, 07.05.Hd, 07.05.Kf, 95.80.+p

1 引言

平方公里阵列望远镜(Square Kilometre Array, SKA)^[1-4]是一项国际大科学工程, 将建造成为世界上最大、最灵敏的射电望远镜. 经过多年的准备工作, 具备SKA望远镜接收能力10%的第一阶段SKA1 (SKA Phase 1, SKA1)已经于2021年7月开始建设, SKA1由位于澳大利亚的SKA1-low和南非的SKA1-mid两个台址

组成, 覆盖频率为50 MHz–15.3 GHz.

SKA使用综合孔径技术, 将阵列中的信号进行合成处理, 提供一个等效口径为1 km²的射电望远镜. SKA将产生海量的数据, 以SKA1-mid为例, 位于阵列附近的中央信号处理器(Centre Signal Process, CSP)对18 Tb/s的数字化数据流进行波束和相关处理^[5], 然后将其传输到开普敦的专用超级计算机进行进一步处理. 这些数据流的处

引用格式: 郭绍光, 陆扬, 安涛, 等. 面向SKA1时代的科学数据流及阵列模拟分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 229504
Guo S G, Lu Y, An T, et al. Scientific data flow and array simulation analysis for the SKA1 era (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 229504, doi: [10.1360/SSPMA-2022-0261](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0261)

理过程对SKA整个系统的设计至关重要,也带来了后续数据管理及数据处理的巨大挑战.参考全球大型强子对撞机计算网格(Worldwide Large Hadron Collider Computing Grid, WLCG),当前的数据将从台址的科学数据处理器(Science Data Process, SDP)传输到各个SKA区域中心(SKA Regional Centre, SRC)需要高速稳定的洲际网络支持^[6].根据每个SRC数据分担的评估,为了满足SKA1的数据传输,网络带宽至少需要达到100 Gbps^[7],才能保证SKA1产生的数据稳定及时地分发到各个SRC, SKA1正式运行后分发到SRC的数据流预估为每年710 PB,算力至少需要25 PFlops^[1,6].这给SKA设计人员带来了两大技术挑战:如何以较低功耗提供足够的算力来处理数据流,如何将如此大量的数据分发传输到位于全球各地的SRC^[7-9].

截至2021年底,最快的高性能计算机(High Performance Computing, HPC)为安装在日本神户Riken计算科学中心的Fugaku¹⁾, HPL基准测试能力为442 PFlops,该超算基于富士通定制的ARM A64FX处理器,并使用富士通的Tofu D互联技术进行节点之间的数据传输.随着网络新技术的发展,包括多芯光纤技术(Multi-Core Fiber, MCF)等,当前全球互联网的总带宽已经达到了618 Tbps.与业界最快的HPC和全球的互联网络相比较,SKA1的算力需求与数据传输规模不算很大,但在单一科学研究领域已经属于相当海量的规模,由于SKA科学研究方向较多,观测模式多样^[10-12],由此导致科学处理的数据流程十分复杂^[13],HPC通常并不能满足其多样化、定制化的需求, SRC的处理将需要使用异构硬件并对不同的科学观测使用不同的处理管线^[14-16],而这些管线根据数据密集型、计算密集型和存储密集型等进行分类处理.

上海天文台在2019年11月SKA工程大会上发布了中国SKA区域中心原型机(Chinese SKA Regional Centre Prototype, CSRC-P),这被SKA组织认定为“世界上首台SKA区域中心原型机”.中国SKA科学计算团队在平台架构、存储和网络等方面开展了先行测调试,当前CSRC-P计算平台采用异构设计,包含23台Intel X86节点、10台ARM节点和4台使用NVIDIA V100的GPU节点,CPU节点总计包含1664核,具备51 TFlops的双精度算力;拥有5.1 PB分

布式存储,约55%的存储已经存放了SKA的先导数据(主要包含MWA, ASKAP, MeerKAT),内部的存储节点和计算节点采用100 G InfiniBand网络互联,与国外其他SRC节点目前具备最高5 Gbps的网络带宽^[9],在SKA的相关科学上做出了诸多的集成和测试^[13-16],当前该平台正参加SKA区域中心全球网络联测.

本文的数据流介绍从阵列的数据接收开始,一直到SRC的科学数据(含图像、元数据、脉冲星候选体等数据^[17]),通过数据传输速率以及算力需求来介绍SKA1的具体数据流,由于SKA1的观测配置目前尚未最终固化,当前对数据流仅进行模型预估处理;通过SKA1的阵列布局具体情况及阵列部署的具体原则对数据流进行定量化的描述;并通过对不同阵列在目前CSRC-P上进行的实验和测试,得出具体数据流,以此来阐述SKA1数据流的概况与全规模SKA正式运行后,对CSRC-P计算、存储和算力的影响.从而给出对未来CSRC-P数据模拟的一些建议和规划.

2 SKA数据流

来自射电源的无线电信号到达SKA望远镜阵列后被天线接收,经过模拟数字转换器(Analog to Digital Converter, ADC)转换为数字信号,随后数据流进入CSP进行相关处理,输出可见度数据,这些数据将经过初步预校准,产生校准数据、图像数据和其他元数据,经深度处理后,这些数据将开放给科学团队,进行后续的科学研究工作.

如图1所示,在整个数据观测处理流程中,SKA1-low的外围站通过远程处理设施(Remote Processing Facilities, RPF)处理后与核心站通过中央处理设备(Central Processing Facilities, CPF)处理后的数据传输到科学操作中心(Science Operations Centre, SOC),SKA1-mid的所有台站直接通过CPF传输到SOC,后续经由科学处理中心(Science Processing Centre, SPC)分发到分布于各大洲的SRC,由SRC将数据开放授权给科学家和用户.

根据当前最新的设计基线^[18],SKA1的详细参数如表1所示,其中 N_f 为观测频率通道最大值,实际观测中不会超过该值.对SKA1-mid观测而言,大多数的观测模式下该值较小,以SKA-VLBI为例,频率通道一

1) <https://www.top500.org/>.

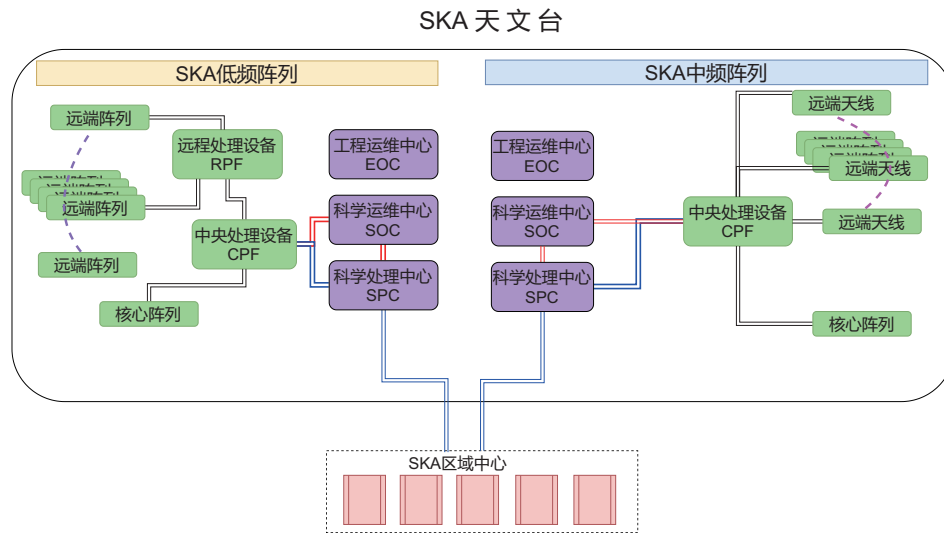


图 1 SKA观测数据流示意图

Figure 1 Schematic of SKA observation data flow.

般64 K就可以满足观测需求²⁾。

当前SKA确定了5个首要的科学目标(Key Science Project, KSP), 包括孕育生命的摇篮, 利用脉冲星和黑洞进行引力的强场检验, 宇宙磁场的起源和演化, 星系演化、宇宙学与暗能量研究, 宇宙黎明和黑暗时期探测, 这些KSP均包括基础物理学、天体物理学或者宇宙学中尚未解决的问题^[1, 19, 20], 由于重大科学发现的不可预见性, SKA投入运行后, 基于其超级巡天能力和灵敏度, 必然蕴含大量的科学发现. 随着SKA1的开工建设, 不需要SKA全规模阵列灵敏度、分辨率或者频率覆盖范围的重要科学主题被确定为高优先级(High Priority Science Objective, HPSO)项目, 经过广泛的论证和讨论, 我国也确定了“2+1”的战略部署, 即确保两个优先突破领域和若干具有特色的研究方向, 并

表 1 SKA1 阵列参数

Table 1 Parameters of SKA1

	SKA1-low ^{a)}	SKA1-mid
台站数量 N_{station}	512	197
积分时间 t_{dump}	0.6 s	0.08 s
频率通道 N_f	256000	256000
波束 N_{beam}	1	1
阵列/口径大小 D_s	35 m	13.5 m/15 m
最大基线 B_{max}	80 km	150 km
观测带宽 $\Delta\nu$	300 MHz	770 MHz
分辨率	7 arcsec	0.25 arcsec

a) SKA1-low的每一个台站包含256个对数周期双极化天线.

于2020年启动了2项SKA科学专项, 分别为宇宙再电离(the Epoch of Reionisation, EoR)项目和脉冲星项目. EoR将利用当前SKA先导阵列的观测数据再现宇宙的黎明, 同时参加大天区的低频巡天, 从统计上揭示宇宙再电离时代的宇宙整体结构特性. 脉冲星项目主要包括脉冲星搜索(Pulsar Search, PSS)和脉冲星计时(Pulsar Timing, PST), 两者主要聚焦于检验引力波理论和探测发现超大质量黑洞的合并事件^[1].

根据当前SKA先导阵列MWA, ASKAP, LOFAR等的经验, 需要传输归档到SRC的数据除了数据立方体数据外, 还包括整个流水线处理优化的UV (Ultra-violet)数据、用于校准流水线的中间产品、UV格点化数据、点源扩散函数(Point Spread Function, PSF)立方体以及多种分辨率的加权和权重信息等^[21–24].

接下来数据流的预估将主要依据HPSO科学目标^[10, 25]及其观测时间占比, 整个流程包括观测数据的初步生成、经过相关处理和预处理等. 当然除此以外, 最终的科学数据还包括项目负责人(Principal Investigator, PI)领导的各个重要观测、其他科学发现以及SKA-VLBI项目等.

2.1 观测台站端

阵列中的天线接收到原始的观测信号后, 根据

2) <https://jumping.jive.eu/exec/d10.2.pdf>.

不同的科学观测目标, 调整观测策略实现不同的观测时间分辨率的设定, 然后使用有限脉冲滤波(Finite Impulse Response, FIR)和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)将其数字信道化. 对于SKA1-low, 还会进行波束合成来进行信号的校准和时延补偿操作.

此处假定天线数目为 N_{ant} , 每个天线有 N_{pol} 路极化输出, 共有 N_{bands} 个波段, 每个波段信号的采集带宽为 $\Delta\nu$, 由奈奎斯特采样定理可知, 采样率至少为 $2\Delta\nu$, 在使用 N 阶FIR时, 计算量大约为 $2N_{\text{tap}}$, 根据FFT的算法复杂度 $O(n\log_n)$ 可知, FFT运算的运算数为 $N\log_N$, 此时每个站经过多项滤波器后需要的操作总数量级为 $2N_{\text{tap}}N_{\text{ant}}N_{\text{pol}}\Delta\nu + 2N_{\text{bands}}\log_2(2N_{\text{bands}})N_{\text{ant}}N_{\text{pol}}\Delta\nu_{\text{band}}$. 对波束合成而言, 通过给每个天线提供正确的延迟来进行校准, 主要用于高时间分辨率和高频率分辨率的科学应用, 如脉冲星和行星闪烁等, SKA1-low的相关处理机波束合成部件(Correlator Beam Former, CBF)接收512个站的数据, 并生成斯托克斯的4个参数数据. 不过此时的校准相对FFT和FIR而言, 计算运算量较小, 此处评估暂时忽略该项, 所以此时对每个观测台站而言, 其输出的整体数据速率 R_{station} 大约为

$$R_{\text{station}} \propto N_{\text{beams}}N_{\text{bands}}N_{\text{pol}}\Delta\nu_{\text{band}}S_{\text{sample}}.$$

由上式可知, 采集带宽和采样比特数极大地影响了每个台站或阵列的数据流, 根据表1进行估算, 可知从台站端到达CSP的速率约在Tbps量级. 中频阵列共计197 (其中64面属于当前MeerKAT阵列)面望远镜, 原始数据输出速率约为2 TB/s; 低频阵列共计131072个天线, 未经过波束合成的原始数据输出速率为158 TB/s.

2.2 CSP

CSP主要用于对来自台站端的数据进行相关处理操作, 在相关处理之前会进行诸如时延补偿的操作, 用于消除由于地球自转引起的条纹旋转; 同时进行更精细的信道化, 用于提高分辨率, 并做带通滤波用于校正台站多项滤波的影响. 根据科学目标的不同, 划分的精细化通道不一定相同, 此处假定波束数为 N_{beams} , 通道数为 N_{chan} , 台站数为 N_{stat} . 在CSP还会进行射频干扰的去除(Radio Frequency Interference, RFI), 由于其计算量较小, 此处估算暂时不考虑, 所以此时CSP输出的数据

速率主要为台站的两两相关处理产生的:

$$R_{\text{csp}} \propto \frac{N_{\text{beams}}N_{\text{chan}}N_{\text{stat}}^2N_{\text{pol}}^2}{t_{\text{dump}}}.$$

由于数据输出速率与台站数的通道数和台站数目的平方成正比, 从表1可知输入可见度的数据速率, SKA1-low的数据速率约为7.15 Tbps, SKA1-mid的数据速率约为6.4 Tbps.

以SKA1-mid为例, CSP将来自天线的输入带宽划分为多个频率通道, 然后分别做互相关处理, 此时的数据流输入为133个SKA天线(每个100 Gbps输出带宽)和64个MeerKAT天线(每个40 Gbps输出带宽)接收数据, CSP的总输入带宽约为57 Tbps. 由于成像数据处理与脉冲星处理的流程不同, 对成像而言, 采用两级信道化, 第一级为512个粗信道, 第二级为64000个精细化通道; 对脉冲星搜索而言, 在300 MHz的子频带上提供约75 kHz的信道化通道, 将时间分辨率降低到约 $\sim 64 \mu\text{s}$; 以6.4 Tbps的速度输出数据 [18].

相关处理将输出可见度数据, 最大的分辨率在SKA1-mid的所有基线上可以达到0.1 s的积分时间. 而相关处理的输出结果主要取决于积分时间和通道数目. 基线依赖平均(Baseline Dependent Averaging, BDA)技术可以减少基于射电干涉仪基线分布的可见度数据量, 通过对全规模SKA1-low的模拟, 预计使用BDA可以将可见度数据量在不同的时间间隔上减少约50%–85% [26–28].

2.3 SDP

SDP接收来自CSP输出的数据进行初步成像预处理, 虽然目前SKA最终的成像策略尚未确定, 不过从当前几个SKA探路者项目(包括欧洲的LOFAR、澳大利亚的MWA和ASKAP)来看, 将主要包括校准、成像的迭代主循环(Major)和反卷积的迭代次循环(Minor), 其中的Major/Minor为主要的计算资源部分. 经过数次迭代后, SDP使用改进的天空模型推导出新的校准参数, 并开始新的校准循环以进一步增强模型, 最后通过恢复残差图像中的源来创建最终的天空图像. SKA1阶段SDP从相关处理设备获取的数据主要包括图像和校准数据等, 通常不会保留可见度数据, 但对SKA1-low的HPSO项目宇宙再电离EoR例外, 因为该项目需

要保留可见度数据才能有效地去除前景干扰. SKA1-mid的SDP接收来自CSP的输入数据以及来自望远镜管理(Telescope Manager, TM)的数据^[29], 并生成包含科学产品和校准产品的数据, 主要为连续谱、谱线立方体成像数据, 脉冲星搜索的候选数据, 暂现源探测数据, 单天线强度数据以及消除大气和电离层影响的校准数据等.

2.4 SRC计算负载需求

SKA一个重要的挑战是需要管理和处理来自不同数据处理流程的数据, 并生成高动态范围的图像和其他数据产品, 对后续科学提供支持^[30]. 根据SDP的当前设计, 标准的数据产品将根据每个观测项目来制定. 对成像观测而言, 均可以在三个维度(两个空间、一个光谱)、偏振及图像中产生最大分辨率的数据产品^[31], 而其中数据量缩减最多的阶段就在将可见度数据进行成像处理的操作过程.

详细的观测数据流如图1所示, 各个阶段的产品数据流如图2所示. 台站产生的原始观测数据, 在SDP经过处理生成初步的科学数据产品, 主要包括成像的数据(如图像或者格点化的可见度数据)和其他数据, 其中成像数据的大小十分依赖于通道数量, 最后的文件大小正比于通道数量, 这些数据通过洲际网络分发到每个区域数据中心的子网络, 天文学家通过互联网连接到区域数据中心进行数据处理, 此时的数据称为高级数据产品(Advanced Data Products, ADP), 此时的ADP可以通过SRC或者云的方案提供给最终的科研人员.

在SKA1的所有处理流水线中, 成像管道占据了主要的计算需求和资源, 如图3所示, 约占SKA1-low观测时间15%和31%的EoR成像和功率谱观测, 对应的计算负载约为31%和55%; 非成像处理管道对计算的需求相对较小, 如脉冲星搜索流水线系统(Pulsar Search Pipeline, PSP), 约占SKA1-low上HPSO时间的39%和SKA1-mid时间的5%. 对SKA1-low而言, 如果不

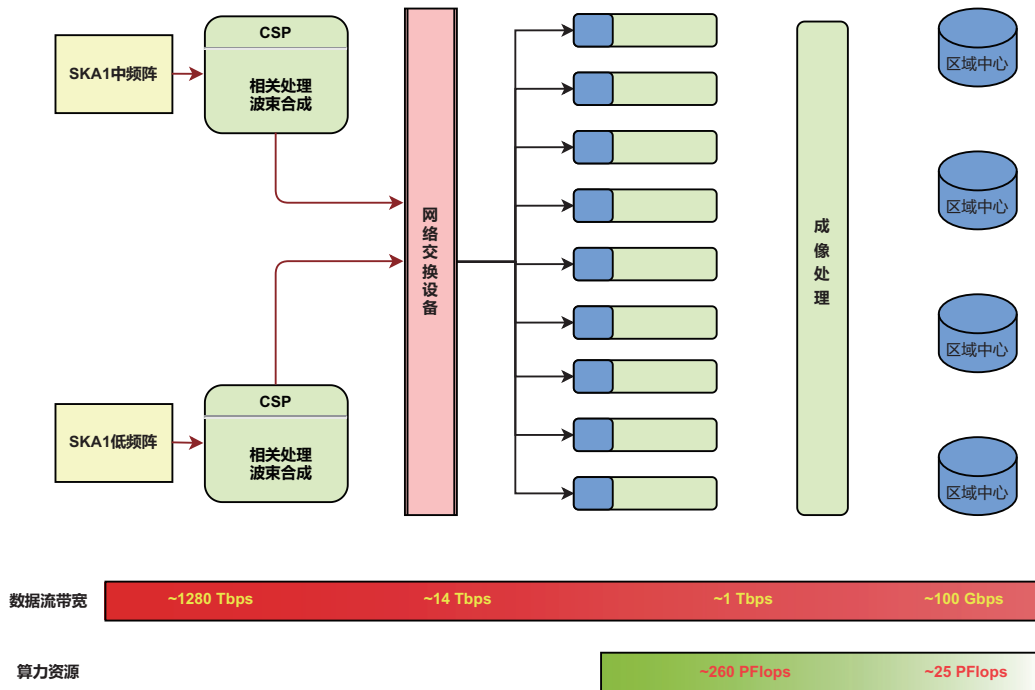


图2 数据流示意图. 数据流带宽在最原始的数据生成时约为1280 Tbps, 经过SKA1-low的波束合成及CSP后, 降低到14 Tbps, 续通过SDP之后约为1 Tbps, 最后达到各个SRC的带宽约为100 Gbps. 根据2020年举办的SKA科学工作组会议, 算力资源的需求在SDP阶段约为260 PFlops, 到达各个SRC之后, 需求为25 PFlops

Figure 2 Schematic of data flow. The bandwidth of the original raw data stream is about 1280 Tbps. It is reduced to 14 Tbps after the beam synthesis of SKA1-low and CSP, then reduced to about 1 Tbps after SDP, and finally the bandwidth to each SRC is about 100 Gbps. According to the SKA scientific working group meeting held in 2020, the demand for computing resources is about 260 PFlops in the SDP stage, and 25 PFlops at SRC.

Telescope time and compute load of SKA1-low/mid

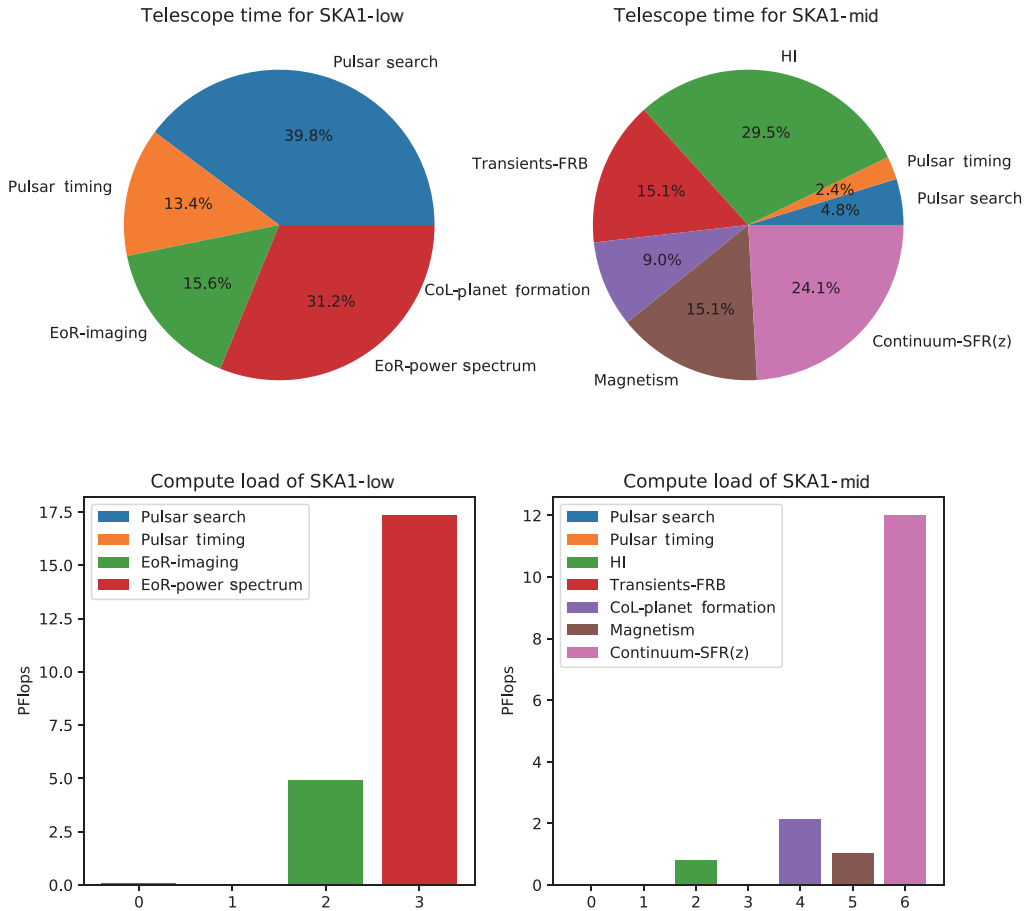


图3 SKA1高优先级项目观测时间与计算负载评估
Figure 3 Estimation of observation time and compute load of SKA1 HPSO.

包含EoR的UV可见度数据, 科学数据速率约为3 Gbps; 若增加UV可见度数据, 那么数据率将增加到25 Gbps. 对SKA1-mid而言, 科学数据速率约为9 Gbps^[32].

以PSP为例, 仅需要实时校准(Real-Time Calibration, RCAL); 但对连续谱成像而言, 还需要迭代自校准(Iterative Self-Calibration, ICAL), 生成泰勒项图像的数据准备管线(Data Preparation Pipeline Producing Taylor-Term Images, DPrepA), 生成粗信道化图像的数据准备管线(Data Preparation Pipeline Producing Coarse Channelised Images, DPrepB); 而谱线成像管线还需要额外地生成精细信道化图像的数据准备管线(Data Preparation Pipeline Producing Fine Channelised Images,

DPrepC).

根据SDP关键设计审查文档³⁾可以得出如图3所示SKA1 HPSO的观测时间与计算负载预估; 通过相应的加权计算, SKA1-low和SKA1-mid最后的计算负载大约至少需要13.6 PFlops和11.5 PFlops, 所以SKA1阶段SRC需要的算力预估为25.1 PFlops.

3 SKA1 阵列布局

为了实现SKA的科学目标, 在建设成本与技术方面要均衡考虑, 需要建造一个满足极端性能要求而且造价相对可控的望远镜. 这需要对当前的科学需求及

3) <http://ska-sdp.org/publications/sdp-cdr-closeout-documentation>.

各种技术参数(阵列的基线长度、尺寸大小、天线灵敏度、功耗等)进行评估. 最终确认了由包含澳大利亚和南非为台址的方案.

在SKA的阵列布局和设计, 优先考虑了KSP科学观测的需要, 通过基线长度的增加, 来提高空间分辨率, 采用核心阵列, 用于增加UV覆盖, 提高灵敏度. 另外在设计中还考虑了包括但不限于频率范围、灵敏度、观测带宽、极化能力、采集面积、基线长度和处理能力等因素. 其中最重要的几个因素如下.

(1) 分辨率: 实现高优先级科学所需要的分辨率需求. 分辨率取决于频率设置, 高频相对低频而言, 更容易实现高空间分辨率. 例如, 150 km的阵列, 在8 GHz观测时, 其分辨率可以达到0.0629 arcsec.

(2) UV快照覆盖: 基线向量的二维分布决定了瞬时空间频率的覆盖范围, 应该尽可能多地覆盖到UV平面, 在螺旋阵列的布局中, 快照覆盖主要由螺旋的旋转角度、螺旋臂上天线的位置以及螺旋臂的数量决定. 在图4和5可以看到螺旋的角度以及天线的位置都经过了调整, 以提供良好的UV覆盖.

(3) 核心区域: 核心区域主要考虑提供足够的灵敏度, 用于支持脉冲星搜索观测和HI线的观测.

3.1 SKA1-mid

SKA1-mid望远镜的运行频段为0.35–15.3 GHz, 位于南非的卡鲁沙漠, 主要进行脉冲星、21 cm中性氢和连续谱的高灵敏度观测等科学研究^[18]. 该望远镜由133个直径为15 m的偏置格里高利天线和MeerKAT阵列64个直径为13.5 m的天线组成. SKA1-mid有一个直径为1 km的核心阵、一个随机放置的3 km的二维阵列和三个螺旋臂, 最长基线为150 km^[5, 33], 具体的布局示意图如图4所示.

3.2 SKA1-low

SKA1-low望远镜的运行频段为50–350 MHz, 部署在澳大利亚西部的默奇森射电天文台, 主要进行宇宙再电离、脉冲星和太阳系外星系等科学研究^[18]. SKA1-low共有131072个对数周期天线, 这些天线分为512个站, 每个站256个天线. 这些站点中的296个将被

配置到一个中心核心区域, 其余216个沿3个旋臂部署, 最长基线为65 km^[33], 具体的布局示意图如图5所示.

当前的孔径综合阵列技术在进行校准和成像算法方面已经相对成熟, 但对于SKA1-mid的量级数据还需要进行软件和算法的研发, 才能支持如此海量的数据, 并在减少人工输入的情况下得到更好的动态范围^[18].

4 实验测试

通过对SKA数据流和SKA1阵列布局的具体分析, 提出了基于当前数据流模型的定量化分析. 随着SKA1的开工建设, 在真正的观测数据到来之前, 通过模拟对数据所需要的计算和存储资源开展分析, 有利于对后续实测数据的科学处理提供一些数据支持. 本节列举了使用OSKAR⁴⁾进行SKA1-low和SKA1-mid的模拟数据生成, 主要阐述了模拟过程的思路、方法、运行及计算的时间和最后产生的数据文件大小等.

OSKAR为剑桥大学开发的用于SKA模拟的一套软件, 基于射电干涉测量方程(Radio Interferometer Measurement Equation, RIME)模拟生成可见度数据, 主要功能为模拟台站波束和干涉阵列数据, 可以生成对应的二进制可见度数据或测量集数据(Measurement Set, MS), 同时还具有将FITS文件转变为天空模型、对可见度数据增加噪声等功能.

模拟实验的策略为选取不同的天空模型源数目, 分别为9, 100, 1024和10000. 观测时间从1 s到24 h, 分别为1, 6, 60, 600, 1200, 2400, 3600, 7200, 14400, 28800, 43200, 54000, 72000和86400 s. 频率通道默认为1, SKA1-mid的观测频率选定为1.4 GHz, 带宽为1 kHz; SKA1-low的观测频率选定为200 MHz, 带宽为30 MHz.

4.1 SKA1-mid模拟数据测试

对于SKA1-mid的模拟试验, 因为计算量不高, 故使用了2种不同的GPU板卡, 用于评估整套模拟系统的可扩展性和稳定性, 板卡分别为NVIDIA的Tesla K40M和Tesla K20X. 其中Tesla K20X基于Kepler架构, 有2688个核, 具备6 GB的内存, 总线带宽可达249.6 GB/s, 双精度的理论值为1312 GFlops; Tesla

4) <https://github.com/OxfordSKA/OSKAR>.

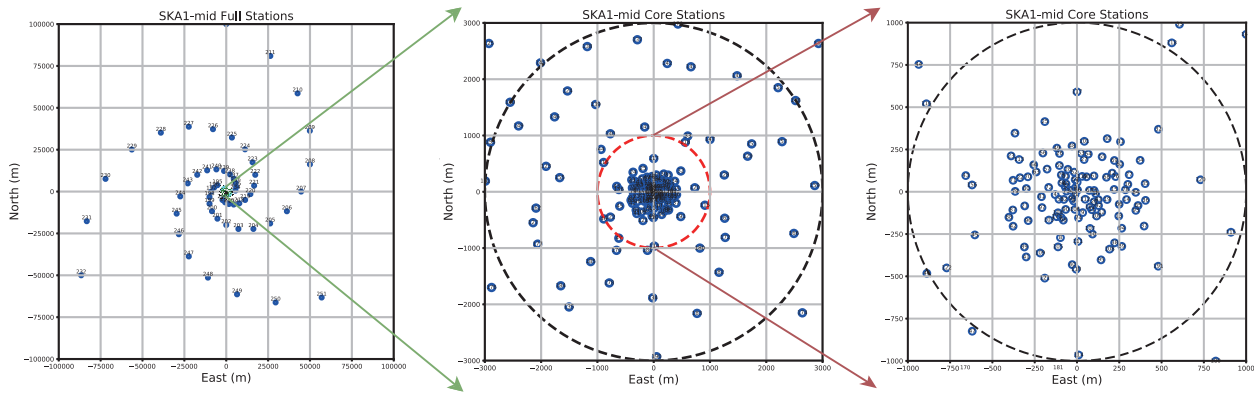


图 4 SKA1中频阵列布局示意图

Figure 4 Schematic of SKA1-mid array layout.

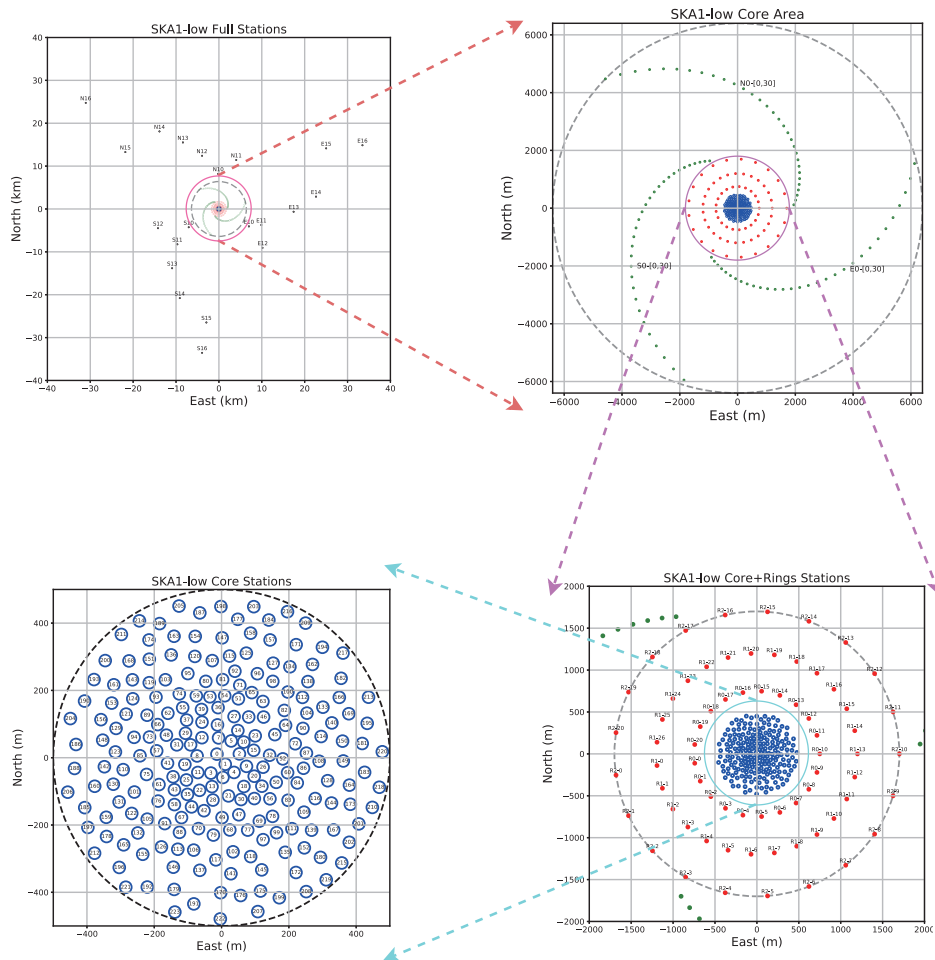


图 5 SKA1低频阵列布局示意图

Figure 5 Schematic of SKA1-low array layout.

K40m基于Kepler架构, 有2880个核, 具备12 GB的内存, 总线带宽可达288.4 GB/s, 双精度的理论值为

1682 GFlops. 可知从具备的核心数、内存、总线带宽和理论值, Tesla K40m均优于Tesla K20X. 从对阵列

的实测结果图6-8也可以看到, Tesla K40m的试验参数比Tesla K20X有所提升, 不过提升不大, 主要因为两个板卡属于同一个系列, 不过Tesla K40m还是具有优势的, 在多点模拟过程中, 消耗的时间均低于对应的Tesla K20X显卡.

4.2 SKA1-low模拟数据测试

由于SKA1-low的台站较多, 算力需求比较大, 将使用CSRC-P平台进行上述模拟测试, CSRC-P搭载的GPU型号为NVIDIA Tesla V100 SXM2, 该GPU采

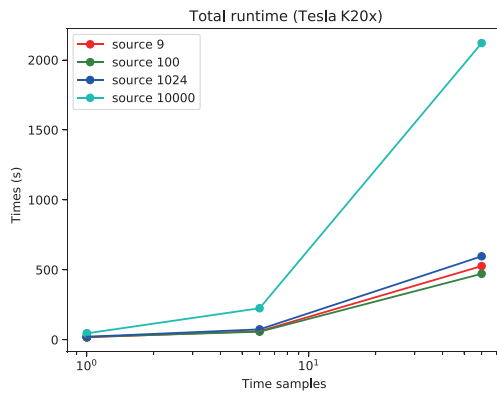


图6 使用Tesla K20X对SKA1中频阵列开展的模拟. 分别使用9, 100, 1024和10000个观测源模拟, 并对每组观测源开展观测时间分别为1, 6和60 s的数据模拟观测

Figure 6 Simulation of SKA1-mid using the Tesla K20X. We choose 9, 100, 1024, and 10000 simulated observation sources, and the observation time for each group of observation sources is 1, 6, and 60 s.

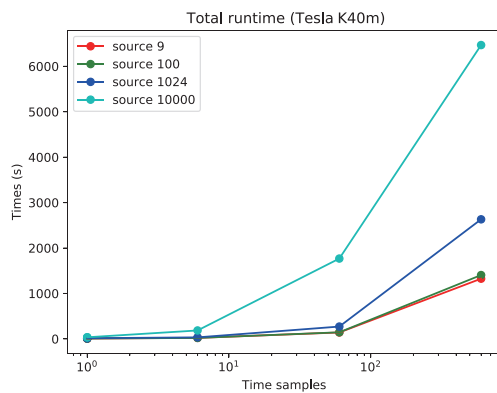


图7 使用Tesla K40m对SKA1中频阵列开展模拟所花费的时间. 分别使用9, 100, 1024和10000个观测源, 并对每组观测源开展观测时间分别为1, 6, 60和600 s的数据模拟

Figure 7 Simulation of SKA1-mid using the Tesla K40m. We choose 9, 100, 1024, and 10000 simulated observation sources, and the observation time for each group of observation sources is 1, 6, 60 and 600 s.

用Volta架构, 有5120个核, 具备32 GB内存, 总线带宽可达897 GB/s, 双精度的理论值为7834 TFlops. 在对SKA1-low进行模拟时, 从图9可以看到对观测时长在2400 s以内的数据, 模拟时间均在100 s以内, 充分显示了V100芯片在计算方面的强大优势.

从表2看到, 最终的模拟数据大小与天空模型中的源相关性不大, 模拟所花费的时间也基本一致, 模拟

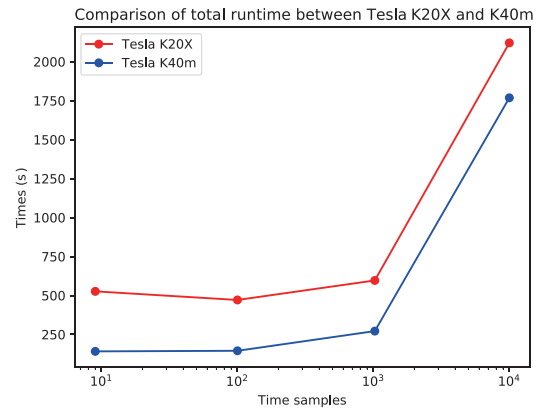


图8 SKA1中频阵列分别使用Tesla K20X与K40m开展模拟所花费的时间对比. 分别使用9, 100, 1024和10000个观测源, 并对每组观测源开展观测时间分别为1, 6和60 s的数据模拟

Figure 8 Comparison between the simulation of SKA1-mid using the Tesla K20X and K40m. We choose 9, 100, 1024, and 10000 simulate observation sources, and the observation time for each group of observation sources is 1, 6 and 60 s.

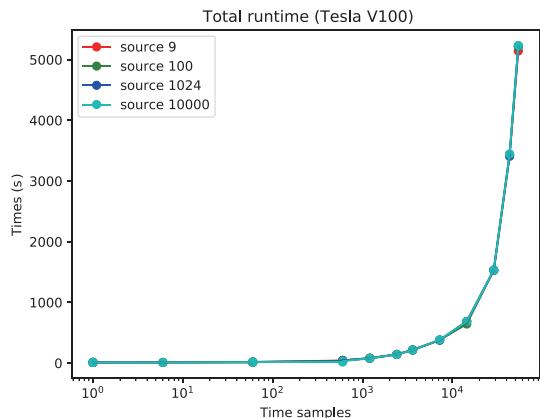


图9 使用Tesla V100对SKA1低频阵列开展模拟所花费的时间. 分别使用9, 100, 1024, 10000个观测源模拟, 并对每组观测源开展观测时间分别从1, 6和60 s逐步增加到15 h的数据模拟观测

Figure 9 Simulation of SKA1-low using the Tesla V100. We choose 9, 100, 1024, and 10000 simulate observation sources, and the observation time for each group of observation sources starts from 1, 6 and 60 s to 15 h.

表 2 SKA1低频阵列模拟数据大小(字节)^{a)}Table 2 SKA1-low simulation filesize (bytes)^{a)}

观测时间单位 (s)	$N_s=9$	$N_s=100$	$N_s=1024$	$N_s=10000$
1	8442505	8442023	8442025	8442024
6	50365065	50364583	50364584	50364584
60	503178874	503178392	503178394	503178394
600	5030775854	5030775370	5030775370	5030775372
1200	10061493857	10061493377	10061493373	10061493375
2400	20122929856	20122929375	20122929381	20122929377
3600	30184365864	30184365380	30184365381	30184365385
7200	60368673866	60368673380	60368673379	60368673381
14400	120737289864	120737289385	120737289380	120737289388
28800	241474521875	241474521391	241474521386	241474521386
43200	362211753879	362211753392	362211753398	362211753392
54000	452764677879	452764677396	452764677394	452764677392
72000	603686217875	603686217395	603686217390	603686217398
86400	724423449873	724423449399	724423449400	724423449397

a) N_s 表示观测源的数目.

的时间与最终生成的可见度数据的大小, 主要取决于观测的时间. 通过设定观测的频率通道可知, 文件的最终大小正比于该值, 对SKA1-low模拟而言, 如果使用表1中最大的频率通道, 每秒产生的可见度数据大小约为2.048 GB, 约2 TB/s.

5 总结与展望

SKA无疑将是有史以来最大的射电观测基础设施之一, 通过对SKA1整套系统的数据流进行了基于模型的预估、分析和模拟, 其Tbps的数据流、PB级的存储

归档需求及观测复杂性, 对后续的数据管理、处理、计算、存储和网络都提出了最严峻的挑战, 通过对整个数据流的讨论, 为后续的中国SKA区域中心的正式运行提供数据系统级的支持. 未来项目的推进将结合射电天文技术以及包括信息、通信和计算机等现代信息技术. 为应对SKA的超大数据流, 也需要对传统框架设计进行革命性的改进和突破, 而这将极大地改变传统天文研究的方式. 在SKA1阶段就需要联合电子学、计算机技术、信息等领域多个学科的专业知识来进行应对. SKA也将特别推动信息技术、天文软件和通信技术等技术的发展.

致谢 本文使用了中国SKA区域中心原型机的资源.

参考文献

- Wu X P. White Paper for China SKA (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [武向平. 中国SKA白皮书. 北京: 科学出版社, 2017]
- Synthetic Analysis Report of China's Participation in SKA (Phase I). Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (2018) (in Chinese). 2018 [中国参加SKA (第一阶段) 综合论证报告. 技术报告, 科学技术部. 2018]
- An T, Wu X P, Hong X. SKA data take centre stage in China. *Nat Astron*, 2019, 3: 1030
- Guo S G, Zheng X Y, Mao Y F, et al. Scheme and prospect of the SKA big data transferring (in Chinese). *E-Sci Tech Appl*, 2018, 9: 3–13 [郭绍光, 郑小盈, 毛羽丰, 等. SKA海量数据传输的方案及展望. 科研信息化技术与应用, 2018, 9: 3–13]
- Swart G P, Dewdney P E, Cremonini A. Highlights of the SKA1-Mid telescope architecture. *J Astron Telesc Instrum Syst*, 2022, 8: 011021
- Quinn P, van Haarlem M, An T, et al. SKA Regional Centres White Paper v1.0. Technical Report, Square Kilometre Array. 2020
- Guo S G, An T, Xu Z J, et al. Progress and prospect of transcontinental high-speed data transmission at the Square Kilometre Array Regional Center in China (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2023, 53: 229502 [郭绍光, 安涛, 徐志骏, 等. 中国SKA区域中心跨洲际高速数据传输进展及展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 229502]
- Jongierius R, Wijnholds S, Nijboer R, et al. An end-to-end computing model for the square kilometre array. *Computer*, 2014, 47: 48–54
- An T, Wu X, Lao B, et al. Status and progress of China SKA regional centre prototype. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2022, 65: 129501

- 10 Quinn P, Axelrod T, Bird I, et al. Delivering SKA science. In: Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). Giardini Naxos, 2015
- 11 An T. Science opportunities and challenges associated with SKA big data. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 989531
- 12 Hollitt C, Johnston-Hollitt M, Dehghan S, et al. An overview of the SKA science analysis pipeline. In: Astronomical Data Analysis Software and Systems XXV. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2017. 367–370
- 13 Lao B Q, Zhang Y K, An T, et al. Software platform on China SKA regional center prototype system (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2023, 53: 229507, ChinaXiv: [202206.00173](#) [劳保强, 张迎康, 安涛, 等. 中国SKA区域中心原型系统——软件平台. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2023, 53: 229507, ChinaXiv: [202206.00173](#)]
- 14 Xu Z J, An T, Guo S G, et al. A machine learning dataset for FRB detection in raw data (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2023, 53: 229505, ChinaXiv: [202206.00185](#) [徐志骏, 安涛, 郭绍光, 等. 一个面向原始数据搜寻的快速射电暴数据集. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2023, 53: 229505, ChinaXiv: [202206.00185](#)]
- 15 Wei J W, Zhang C F, Zhang Z L, et al. Parallel optimization of the pulsar search pipeline (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2023, 53: 229506, ChinaXiv: [202206.00186](#) [韦建文, 张晨飞, 张仲莉, 等. 射电脉冲星搜索的优化方法. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2023, 53: 229506, ChinaXiv: [202206.00186](#)]
- 16 Wei J W, Zhang C F, Lao B Q, et al. Optimization of parallel processing of the Square Kilometre Array low-frequency imaging pipeline (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2023, 53: 229503, ChinaXiv: [202206.00187](#) [韦建文, 张晨飞, 劳保强, 等. SKA低频成像管线并行优化. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2023, 53: 229503, ChinaXiv: [202206.00187](#)]
- 17 Braun R, Bourke T L, Green J A, et al. Advancing astrophysics with the square kilometre array. In: Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). Giardini Naxos, 2015. id.174
- 18 Dewdney P. SKA1 System Baseline Design. Technical Report, SKA Organisation. 2016
- 19 Carilli C L, Rawlings S. Motivation, key science projects, standards and assumptions. *New Astron Rev*, 2004, 48: 979–984
- 20 Bourke, T, Braun, R, Fender, R, et al. Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). Sicily, 2015, doi: 10.22323/1.215.0174
- 21 Whitney A, Booler T, Bowman J, et al. The murchison widefield array (MWA): Current status and plans. In: American Astronomical Society Meeting Abstracts# 218. Bulletin of the American Astronomical Society, 2011. 132.07
- 22 van Haarlem M P, Wise M W, Gunst A W, et al. LOFAR: The LOw-Frequency ARray. *Astron Astrophys*, 2013, 556: 629–635
- 23 Jonas J L. MeerKAT as an SKA Pathfinder; The MeerKAT SKA precursor telescope. In: Heald G, Serra P, eds. Proceedings of the Panoramic Radio Astronomy: Wide-field 1-2 GHz research on galaxy evolution. Groningen, 2009. id.4
- 24 Johnston S, Bailes M, Bartel N, et al. Science with the Australian square kilometre array pathfinder. *Publ Astron Soc Aust*, 2007, 24: 174–188
- 25 Ford D, Bolton R C, Colegate T, et al. The SKA cost/performance tool: A hierarchical SKA modelling tool. In: Proceedings of the Wide Field Astronomy & Technology for the Square Kilometre Array. Chateau de Limelette, 2009. id.22
- 26 Cotton W D. Special problems in imaging. In: Perley R A, Schwab F R, Bridle A H. Synthesis Imaging in Radio Astronomy. Astronomical Society of the Pacific, vol. 6. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1989. 233–246
- 27 Cotton W D. Special problems in imaging. In: Perley R A, Schwab F R, Bridle A H. Synthesis Imaging in Radio Astronomy II. Astronomical Society of the Pacific, vol. 180. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1999. 357–370
- 28 Deng Q W, Wang F, Deng H, et al. Performance evaluation of baseline-dependent averaging based on full-scale SKA1-LOW simulation. *Res Astron Astrophys*, 2022, 22: 045014
- 29 Natarajan S, Barbosa D, Barraca J P, et al. SKA Telescope Manager (TM): Status and architecture overview. In: Proceedings of the SPIE 9913, Software and Cyberinfrastructure for Astronomy IV, 991302. Edinburgh, 2016. id.991302
- 30 Alexander P, Bregman J A, Faulkner A J. SKA data flow and processing. In: Proceedings of Wide Field Astronomy & Technology for the Square Kilometre Array. Chateau de Limelette, 2009. id.16
- 31 Spekkens K, Chiang C, Kothes R, et al. Final report to LRP panel: The square kilometre array, 2019. https://skatelescope.ca/wp-content/uploads/2020/01/PUBLIC_Final_SKA_Report_to_LRP_Panel_18Oct2019.pdf
- 32 Broekema P C, van Nieuwpoort R V, Bal H E. The square kilometre array science data processor. Preliminary compute platform design. *J Inst*, 2015, 10: C07004
- 33 Grainge K, Alachkar B, Amy S, et al. Square Kilometre Array: The radio telescope of the XXI century. *Astron Rep*, 2017, 61: 288–296

Scientific data flow and array simulation analysis for the SKA1 era

GUO ShaoGuang^{1,2*}, LU Yang¹, AN Tao¹, LAO BaoQiang^{1,3},
XU ZhiJun¹, WU XiaoCong¹ & LV WeiJia¹

¹*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³*School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650500, China*

After years of planning for the next generation of radio telescopes, the Square Kilometer Array (SKA), construction of SKA phase one (SKA1) started in July 2021. After the formal operation of SKA1, it is expected that 710 petabytes of scientifically processed data will be generated every year. The data will be stored at SKA regional centers around the world for further analysis by scholars. This paper quantitatively analyzes the models of the SKA observation station, central signal processor, scientific data processing, and regional center. The data flow evaluation at each stage and the demand for the computing power of scientific data processing are obtained based on the high-priority scientific observation of SKA1. Taking the current SKA1-low and SKA1-mid arrays as examples, the key factors affecting interference array layout, including resolution, sensitivity, and ultraviolet coverage, are summarized. Finally, OSKAR is used to simulate data from interference arrays. The scalability and stability of the system are determined using the SKA1-mid simulation. It can be seen from the simulation of SKA1-low on CSRC-P that the design of the prototype SKA regional center in China has been fully optimized. In addition, the detailed requirements of computing power and the detailed information on data volume are obtained. The SKA's demand for data processing, computing, and storage necessitates a combination of technologies and interdisciplinary efforts from fields such as electronics, communication, information technology, and computer.

square kilometre array, data simulation, synthesis array, data format

PACS: 07.05.Bx, 07.05.Hd, 07.05.Kf, 95.80.+p

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0261](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0261)