



Il Colle di
Galileo

Il contributo dell'INAF- Osservatorio Astrofisico di Arcetri alla tecnologia ed alle prime osservazioni di SKA-Low

*The INAF-Arcetri Astrophysical Observatory contribution
to SKA-Low: technology and first observations*

Giulia Macario, Carlo Baffa, Carolina Belli, Pietro Bolli,
Simone Chiarucci, Giovanni Comoretto, Paola Di Ninni,
Elisabetta Giani, Georgios Kyriakou
INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. SKA (*Square Kilometre Array*), la più estesa e potente rete interferometrica di radiotelescopi al mondo nella banda di frequenze da 50 MHz a 15 GHz, è attualmente in fase di costruzione. A partire dal prossimo decennio, le prestazioni senza precedenti di SKA rivoluzioneranno l'astrofisica moderna. Il gruppo tecnologico di radioastronomia dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (INAF) contribuisce attivamente alle fasi di design, sviluppo e validazione di SKA-Low, la componente di SKA operante a bassa frequenza (50-350 MHz).

Parole chiave. SKA, radiotelescopi, array di aperture, calibrazione.

SKA (*Square Kilometre Array*) è un progetto globale finalizzato alla costruzione della più estesa infrastruttura radio-astronomica del mondo. Coordinato

Abstract. SKA (*Square Kilometre Array*), the largest and most powerful interferometric array of radio telescopes in the world in the 50 MHz to 15 GHz frequency range is currently under construction. Its unprecedented performance will revolutionize modern astrophysics starting from the next decade. The technological radioastronomical group at the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory is actively involved in the design, development and validation of SKA-Low, the low-frequency (50-350 MHz) component of SKA.

Keywords. SKA, radio telescopes, aperture arrays, calibration.

SKA (*Square Kilometre Array*) is a global project aimed at building the largest radio-astronomical infrastructure in the world. Coordinated by the SKA Observatory (SKAO [1]) intergovernmental organization based in Jodrell Bank (United Kingdom), which currently involves 14

dall'Osservatorio SKA (SKAO [1]), organizzazione intergovernativa con sede a Jodrell Bank (Regno Unito) che attualmente conta 14 stati membro, rappresenta uno dei più ambiziosi e ingenti sforzi scientifico-ingegneristici della storia. Conterà migliaia di radiotelescopi, dislocati in due siti desertici tra i più remoti della Terra, selezionati sulla base delle condizioni atmosferiche e di "silenzio radio" (quasi totale assenza di radio-interferenze provenienti da terra). La regione di Karoo, in Sudafrica, ospiterà SKA-Mid, la componente operante a frequenze medio-alte (tra 350 MHz e 15.3 GHz), mentre nella contea di Murchison, in Australia Occidentale, sarà costruito SKA-Low, dedicato alle osservazioni nel regime di basse frequenze (da 50 a 350 MHz). Nella prima fase scientifica, circa 200 antenne paraboliche orientabili disposte su di un'area di ~150 km comporranno SKA-Mid, mentre SKA-Low conterrà oltre 130,000 antenne fisse che si estenderanno in un'area di ~65 km di diametro. Entrambe le componenti di SKA consentiranno di mappare e monitorare vastissime aree di cielo migliaia di volte più velocemente rispetto agli altri radiotelescopi esistenti, raggiungendo livelli estremamente alti di risoluzione angolare (fino al millesimo di secondo d'arco) e di sensibilità (rumore fino all'ordine del micro-Jy). Tali prestazioni forniranno alla comunità astrofisica l'opportunità di investigare con grande dettaglio temi fondamentali come la formazione e l'evoluzione delle prime stelle e galassie dopo il Big Bang, il ruolo del magnetismo cosmico, la natura della gravità, e la vita nell'Universo: una rivoluzione delle conoscenze astrofisiche e l'inizio di una nuova era della radioastronomia [2,3].

SKA-Low sarà un radiointerferometro a sintesi di apertura, situato intorno al sito del *Murchison Radio-astronomy Observatory* (MRO) e composto da un in-

member states, SKA represents one of the biggest and most ambitious efforts in the history of science and engineering. It will comprise thousands of radio telescopes located in two desertic sites among the most remote on Earth, selected on the basis of atmospheric conditions and "radio silence" (almost total absence of terrestrial radio frequency interference). The Karoo region in South Africa will host SKA-Mid, the component operating in the medium-high frequency range (350 MHz to 15.3 GHz), while SKA-Low (operating at low frequencies, from 50 to 350 MHz) will be built in the Murchison County of Western Australia. In the first scientific phase, SKA-Mid will consist of about 200 steerable dishes arranged across an area of ~150 km, while SKA-Low will number over 130,000 not mechanically steerable log-periodic antennas installed over an area of ~65 km in diameter. Both components of SKA will enable the mapping and monitoring of vast areas of the sky thousands of times faster than all other existing radio telescopes, reaching extremely high levels of angular resolution (up to ~1/1000 of arcseconds) and sensitivity (noise up to ~1 μ Jy). These performances will allow astrophysicists to investigate in great detail fundamental themes such as the formation and evolution of the first stars and galaxies after the Big Bang, the role of cosmic magnetism, the nature of gravity, and life in the Universe: a revolution of astrophysical knowledge and the beginning of a new era of radioastronomy [2,3].

SKA-Low will be an Aperture Synthesis telescope, located around the site of the Murchison Radio-astronomy Observatory (MRO) and consisting of 512 phased aperture arrays (stations) with no moving parts. Half of these stations will be located across a circular region of ~1 km diameter, forming the dense core of the telescope; the other half of the stations will be distrib-

sieme di 512 stazioni senza parti in movimento. Metà di queste saranno posizionate in una regione circolare di circa 1 km di diametro, che costituirà il nucleo denso del telescopio; l'altra metà delle stazioni sarà invece distribuita in modo molto più distanziato lungo tre bracci quasi a spirale. Ogni stazione sarà composta da 256 antenne distribuite in modo quasi-casuale su un'area circolare di circa 40 m di diametro (Figure 1 e 2A). Per consentire il puntamento e l'inseguimento di radio sorgenti, in assenza di parti in movimento, ogni stazione sarà dotata di un sistema di elettronica digitale per la formazione del diagramma di radiazione (*beam forming*) altamente flessibile e d'avanguardia.

Le frequenze alle quali opererà SKA-Low consentiranno di studiare l'idrogeno atomico ad altissimo redshift ($z = 3-27$), permettendo di esplorare il periodo in cui le prime stelle hanno re-ionizzato il gas intergalattico e di investigare le prime fasi della formazione delle galassie. Il telescopio verrà inoltre impiegato per la ricerca di pulsar e per la rivelazione di fenomeni radio transienti (*Fast Radio Bursts*). Grazie all'estrema rapidità di puntamento elettronico, SKA-Low permetterà inoltre la ricerca delle controparti radio di fenomeni rilevati con altre tecniche, come le onde gravitazionali o i *Gamma Ray Bursts*.

Il coinvolgimento tecnologico dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) in SKA è stato, fin dalle prime fasi del progetto, ampio ed articolato [4]. Questo contributo si soffermerà sull'attività svolta da ricercatrici e ricercatori del gruppo tecnologico di radioastronomia dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (INAF-OAA) sul radiotelescopio SKA-Low [5].

uted in a more widespread configuration along three quasi-spiral arms. Each station will consist of 256 antennas, distributed quasi-randomly over a circular area of ~ 40 m in diameter (Figures 1 and 2A). In the absence of moving parts, the pointing and tracking of regions of the sky will be possible thanks to a highly flexible digital beamforming system and state-of-the-art electronics.

SKA-low will allow us to observe the atomic hydrogen at very high redshift ($z = 3-27$), enabling the exploration of the epochs in which the first stars re-ionized the intergalactic gas, and to investigate the early stages of galaxy formation. The telescope will also be used to search for pulsars and to detect radio transient phenomena (Fast Radio Bursts). The extremely fast electronic pointing of SKA-Low will make it suitable for following-up radio counterparts of phenomena detected with other techniques, such as gravitational waves and Gamma Ray Bursts.

The technological involvement of the National Institute of Astrophysics (INAF) in SKA has been inter-disciplinary and significant right from the initial phases of the project [4]. This contribution will focus on the activities carried out by the researchers of the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory radioastronomy technological group for the SKA-Low radio telescope [5].

Design and electromagnetic analysis of SKA-Low antennas

Satisfying the technological requirements of SKA-Low, based on the ambitious scientific aims of SKA, requires, among the numerous disciplines involved, in-depth activity within the

Progettazione ed analisi elettromagnetica delle antenne di SKA-Low

Soddisfare i requisiti tecnologici di SKA-Low, definiti sugli ambiziosi obiettivi scientifici di SKA, richiede, tra le tante discipline coinvolte, un'attività in ambito di elettromagnetismo applicato molto approfondita per progettare, ottimizzare e caratterizzare il sistema radiante. Il gruppo di elettromagnetismo di INAF-OAA contribuisce dal 2015, assieme a partner privati (Sirio Antenne¹ e IDS²) e ad istituti di ricerca nazionali (CNR-IEIT, INAF-IRA), a tre linee di ricerca principali:

i) Progettazione dell'antenna SKALA4.1: partendo da versioni precedenti di antenna SKALA (*Square Kilometre Array Log Periodic Antenna*), INAF ha proposto la versione 4.1, che è stata selezionata nel 2019 da SKAO come soluzione da implementare in SKA-Low. Si tratta di un'antenna in alluminio log-periodica a doppia polarizzazione ed a larga banda (~ 300 MHz), alta circa 2 metri, caratterizzata da 20 dipoli per polarizzazione, con impedenza di ingresso a 50 Ohm,

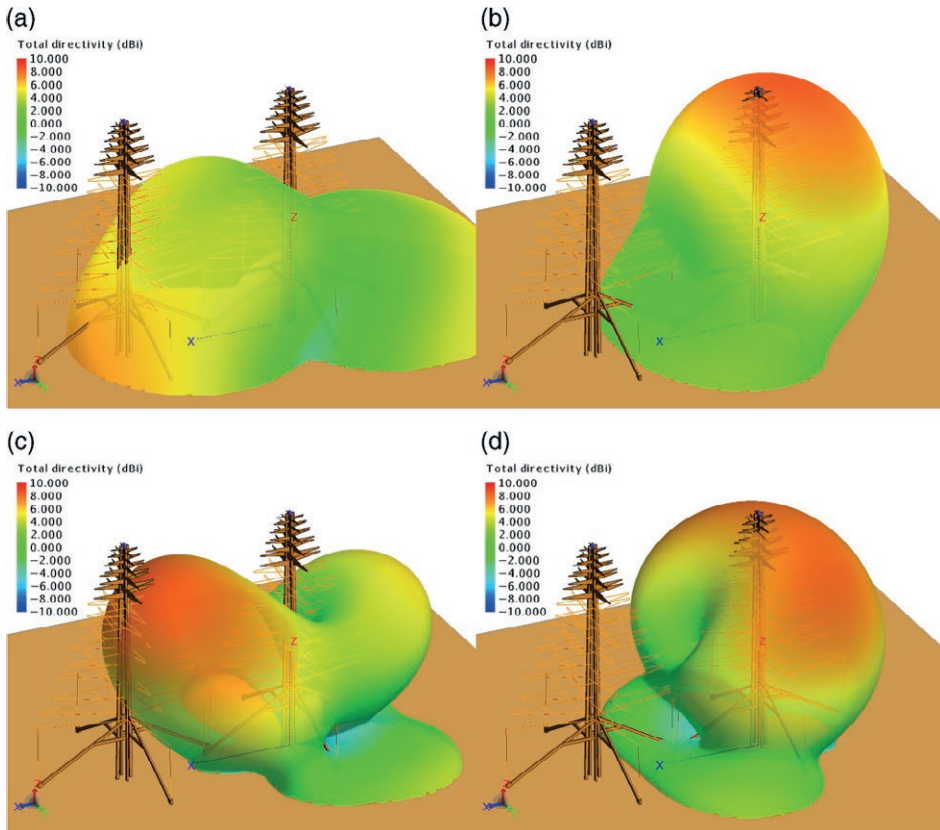


Figura 1. Diagrammi di radiazione in 3D simulati per un'antenna SKALA4.1 in presenza di una seconda antenna, a quattro differenti frequenze della banda di SKA-Low ((a) 54.5 MHz, (b) 57 MHz, (c) 77 MHz e (d) 78 MHz).
 Figure 1. Simulated 3D antenna pattern of a SKALA4.1 antenna in the presence of another one, at four different frequencies of the SKA-Low band ((a) 54.5 MHz, (b) 57 MHz, (c) 77 MHz and (d) 78 MHz).

ed agganciata elettricamente ad un piano di massa a griglia [6]. L'antenna è stata costruita dalla ditta Sirio Antenne dapprima come prototipo e, nel 2019, in 256 unità che sono state installate al sito di MRO dove è stata realizzata la stazione prototipo di SKA-Low denominata *Aperture Array Verification System 2* (AAVS2).

ii) Analisi elettromagnetica della stazione: numerose simulazioni elettromagnetiche sono state condotte sulla stazione di SKA-Low utilizzando software commerciali quali FEKO e Galileo (quest'ultimo implementato da IDS). Queste permettono di ottenere con elevata accuratezza le risposte singole delle antenne al variare della frequenza e della direzione di osservazione [7], in presenza di tutte le altre antenne considerate passive (Figura 1).

iii) Caratterizzazione sperimentale dei diagrammi di radiazione di antenne a bassa frequenza: il gruppo ha anche partecipato a campagne di misure dei diagrammi di radiazione di antenne attraverso un sistema di misura costituito da un'antenna trasmittente posta su un drone. Tale sistema, progettato dal CNR-IEIIT, è fondamentale per verificare i modelli elettromagnetici numerici [8].

Beamforming firmware di SKA-Low

Il gruppo di tecnologico di radioastronomia di INAF-OAA ha inoltre sviluppato gli algoritmi per il sistema di processamento digitale dei segnali raccolti dalle antenne di SKA-Low. Questo è composto da 8192 schede, progettate e realizzate da un consorzio di strutture INAF ed interamente costruite in Italia. In

framework of applied electromagnetics, in order to design, optimize and characterize the radiating system. Since 2015, the electromagnetics group of INAF-OAA, working together with private partners (Sirio Antenne¹ and Ingegneria dei Sistemi²) and national research institutes (CNT-IEIIT and INAF-IRA), has contributed to three principal areas of research:

i) Design of the SKALA4.1 antenna: starting from previous versions of SKALA (Square Kilometre Array Log Periodic Antenna), INAF proposed the 4.1 version, selected in 2019 by SKAO as the solution to implement in SKA-Low. This is an aluminum log-periodic, dual-polarized, wideband antenna (~300 MHz), almost 2 m tall, consisting of 20 dipoles for each polarization and with an input impedance of 50 Ohm, electrically attached to a wire lattice ground plane [6]. The antenna was built by Sirio Antenne, initially as a prototype; then, in 2019, 256 elements were installed at the MRO site where the *Aperture Array Verification System 2* (AAVS2) SKA-Low prototype station was built.

ii) Electromagnetic analysis of the station: numerous electromagnetic simulations were carried out on the SKA-Low station using commercial full-wave software such as FEKO and Galileo. These make it possible to obtain a very accurate individual response from the antennas, in presence of all the other antennas considered as passive (Figure 1) [7].

iii) Experimental characterization of low frequency antenna radiation patterns: the group has also participated in campaigns for the measurement of the antenna patterns by means of a measuring system comprising a transmitting antenna installed on a drone. This system, designed by CNR-IEIIT, is essential to verify the numerical electromagnetic models [8].

ogni stazione il sistema combina digitalmente i segnali di 256 antenne, correggendo ciascun segnale per gli effetti introdotti dalle antenne, riproducendo così l'equivalente di una singola parabola ricevente. Combinando in modo diverso il segnale ricevuto dalle singole antenne è possibile osservare contemporaneamente fino a 48 differenti direzioni in cielo. In questo modo si possono eseguire simultaneamente più osservazioni indipendenti, ed effettuare rapidamente *survey* di ampie zone di cielo. Il sistema deve processare una quantità enorme di dati: il traffico dati generato dal sistema di acquisizione è pari a quello che veniva prodotto dall'intera rete Internet mondiale nel 2016. Il sistema è stato ottimizzato per combinare le grandi capacità di calcolo richieste (circa 6 peta-flops), un costo contenuto, ed un consumo di energia compatibile con le limitate risorse presenti in mezzo ad un deserto: per soddisfare questi requisiti sono stati sviluppati algoritmi di processamento molto efficienti basati su logiche programmabili. Parte dell'energia elettrica necessaria sarà prodotta utilizzando pannelli fotovoltaici ed un sistema di accumulo a batterie al litio [9].

Software di controllo di SKA

La scala e la flessibilità di SKA richiedono un grosso salto in avanti nel sistema di controllo. Questo deve essere in grado di gestire molte osservazioni indipendenti, di tipo differente, eseguite simultaneamente, ripartendo correttamente un numero enorme di risorse eterogenee che possono generare tipi di dati differenti.

SKA-Low beamforming firmware

The INAF-OAA technological radioastronomical group also developed the algorithms for the system used for the digital processing of the signals collected by the SKA-Low antennas. This is made up of 8192 boards, designed and developed by a consortium of INAF facilities and built entirely in Italy. In each station, the system digitally combines the signals of 256 antennas, correcting each signal for the effects introduced by the antennas, reproducing the equivalent of a single receiving parabolic dish. By combining the signal received by the single antennas in different ways, it is possible to observe up to 48 different directions in the sky at the same time. In this way, several independent observations can be performed simultaneously, making it possible to quickly survey large areas of the sky. The system has to process an enormous amount of data: the data generated by the acquisition system is equivalent to that produced by the entire global Internet network in 2016. The system has been optimized to combine the large computational capacities required (about 6 peta-flops), low costs and an energy consumption compatible with the limited resources available in the middle of a desert. To meet these requirements, highly efficient processing algorithms based on programmable logics have been developed. Part of the electricity needed will be produced using photovoltaic panels and a lithium battery storage system [9].

Deve operare in modo quasi automatico, scegliendo in ogni istante le osservazioni che meglio si adattano alle disponibilità del telescopio ed alla situazione ambientale (ad esempio la presenza di interferenze). Deve controllare in continuazione lo stato delle centinaia di migliaia di elementi che lo compongono, isolare gli elementi guasti e continuare a funzionare correttamente nonostante la presenza di singoli elementi malfunzionanti. Il sistema di controllo di SKA è stato disegnato tenendo conto di questa sfida, in una struttura *top-down*: tutte le interazioni con l'osservatore ed il controllo della struttura del telescopio sono centralizzate, ed ogni (sub-)elemento ha un proprio sistema di controllo (LMC) che comunica col sistema centrale attraverso un unico punto di contatto. In questo modo ogni nodo permette di controllare tutto l'albero dei componenti che ne dipendono. Inoltre ne presenta un sommario dello stato dei componenti sottostanti (*wrap-up*). Il gruppo di tecnologico di radioastronomia di INAF-OAA ha sviluppato il sistema di controllo del correlatore/*beamformer* di SKA-Low e SKA-Mid, cioè dell'elemento che raccoglie i segnali di tutte le stazioni e li combina in un insieme di dati analizzabili dal software scientifico [10,11].

Strumento di modellizzazione del sistema

Il gruppo di radioastronomia di INAF-OAA ha contribuito anche nell'ambito dell'ingegneria di sistemi. Durante le fasi di preparazione della documentazione di SKA-Low è stato utilizzato uno strumento di modellizzazione del sistema allo

SKA control software

The scale and flexibility of the SKA require a huge leap forward in the control system. This has to be able to manage numerous different types of observation at the same time, successfully sharing an enormous quantity of heterogenous resources that can generate different types of data. It has to operate almost automatically, choosing the observations that best adapt to the availability of the telescope and the environmental situations (the presence of interference, for instance) at any time. It has to constantly monitor the status of its hundreds of thousands of components, isolate any faulty elements and keep working properly even in the presence of single malfunctioning elements. Taking this challenge into consideration, the SKA control system has been designed as a top-down structure: all the interactions with the observer and the control of the telescope structure are centralized through a single point of contact. Each node will enable the control of the entire tree of components that depend on it. A summary of the status of the underlying components (*wrap-up*) is also provided. The INAF-OAA technological radioastronomical group has developed the system for the control of the SKA-Low and SKA-Mid correlator/*beamformer*, i.e.: the element that collects the signals from all the stations and combines them into a set of data that can be analyzed by the scientific software [10,11].

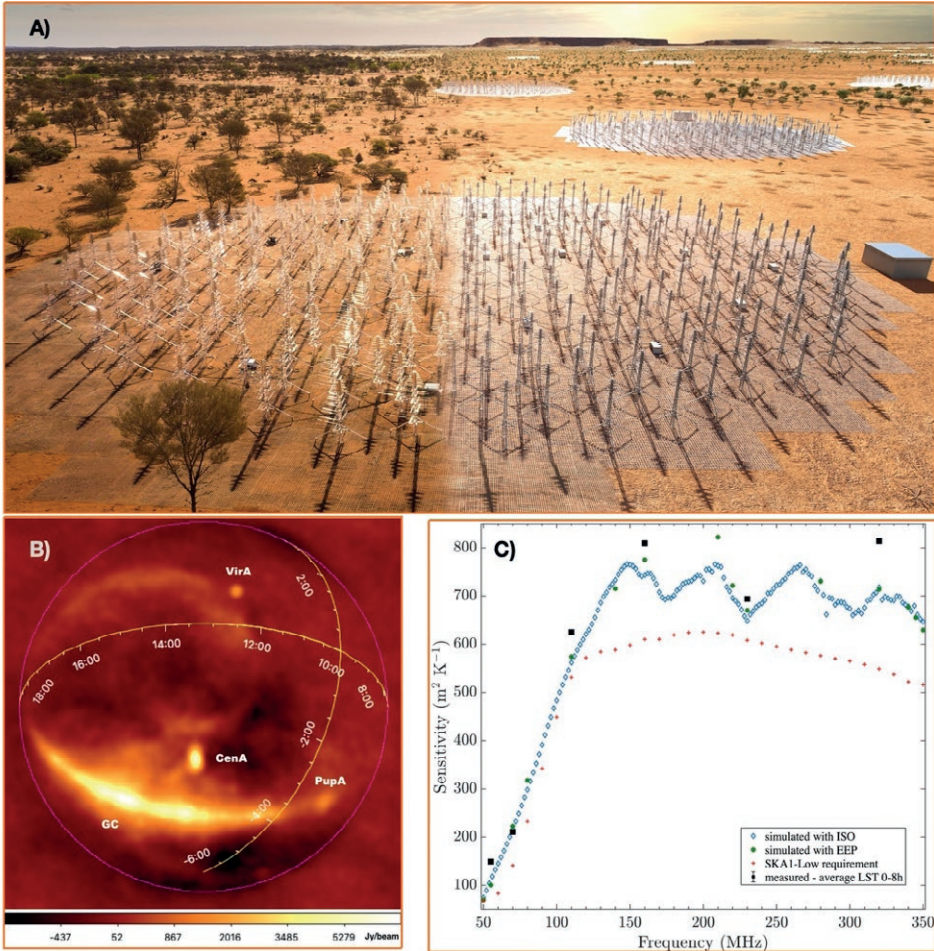


Figura 2. A) Vista aerea del futuro telescopio SKA-Low a MRO. Fotografia reale del prototipo AAVS2 (sinistra) con sovrapposta una riproduzione delle altre stazioni SKA-Low (crediti: ICRAR). B) Esempio di immagine di tutto il cielo ottenuta da osservazioni AAVS2 a 160 MHz. C) Sensibilità di SKA1-Low simulata (blu/verde), attesa (rosso) e misurata (nero) nella banda si SKA-Low.

Figure 2. A) Composite image of SKA-Low antennas at MRO, blending a real picture of AAVS2 (on the left) with an artist's impression of the telescope (credits: ICRAR). B) Example of all-sky image from AAVS2 observations at 160 MHz. C) SKA-Low sensitivity across the bandwidth from observations (black), simulations (blue/green), and requirements (red).

scopo di aiutare la progettazione del telescopio. Questo strumento, che adotta il linguaggio grafico System Modelling Language (SysML), rappresenta la struttura di scomposizione del prodotto al fine di identificare le connessioni tra i suoi elementi e le interfacce che lo caratterizzano, e di descrivere le funzioni ed i flussi di dati associati ad ogni elemento. I diagrammi di flusso così ottenuti sono stati utilizzati nella fase di Critical Design Review di SKA-Low. Tale approccio ha portato una grande semplificazione nelle modifiche e nel mantenimento della documentazione [12]. Un altro importante contributo, in collaborazione con lo SKAO, è stato nell'ambito della valutazione dell'aderenza del progetto ai requisiti stabiliti, necessario per gli studi di Design for Manufacturing in vista della produzione industriale.

Osservazioni astronomiche di validazione della stazione AAVS2

Dal 2019, il gruppo di radioastronomia di INAF-OAA, in collaborazione con INAF-IRA (Bologna e Medicina) e ICRAR (Curtin, Australia), contribuisce attivamente alla caratterizzazione delle prestazioni di SKA-Low tramite l'utilizzo delle prime osservazioni astronomiche ottenute con la stazione prototipo AAVS2, l'ultimo dimostratore ingegneristico di una stazione completa costruito al sito di MRO (Fig. 2, A). Il gruppo ha sviluppato procedure software per processare la grande mole di dati ottenuti dalle osservazioni interferometriche durante i primi due anni di attività della stazione. Ha utilizzato osservazioni a sei diverse fre-

System modeling tool

The INAF-OAA technological radioastronomical group contributed also to the system engineering. During the preparation of the documentation for SKA-Low, a system modeling tool was used to aid the design of the telescope. This tool, which uses the System Modeling Language (SysML), represents the product breakdown structure, identifying the connections between its elements and characterizing interfaces, and describing the functions and the data flows associated with each element. The flow charts obtained in this way were used during the SKA-Low Critical Design Review. This approach allowed considerable simplification of the amendments and maintenance of the documentation [12]. Another important contribution, in collaboration with SKAO, was related to the assessment of compliance with project requirements, crucial for the Design for Manufacturing studies in view of industrial production.

Astronomical validation of the SKA-Low station AAVS2

Since 2019, the technological radioastronomical group of INAF-OAA, in collaboration with the INAF-IRA (Bologna and Medicina) and ICRAR (Curtin, Australia), has actively contributed to the characterization of SKA-Low performances, through the first astronomical observations obtained with AAVS2, the last prototype of a complete SKA-Low station built at the MRO site (Fig. 2, A). The group has developed software procedures to process the large amount of data

quenze (55, 70, 110, 160, 230, e 320 MHz) che campionano la banda operativa del telescopio. Grazie a questo sforzo, è stato possibile calibrare i dati, e produrre ed analizzare le immagini di tutto il cielo visibile dalla stazione. Ciò ha permesso di ottenere una validazione iniziale di alcuni requisiti e prestazioni cruciali di SKA-Low: la sua sensibilità, la “calibrabilità” e la stabilità del sistema (Figura 2, B e C). Un’ulteriore attività attualmente in corso è relativa a caratterizzare le prestazioni in polarizzazione della stazione, altrettanto fondamentali per gli obiettivi scientifici di SKA. Nei prossimi tre anni, sei stazioni come AAVS2 saranno costruite e collegate insieme per formare il primo prototipo di produzione di SKA-Low [13].

I risultati finora ottenuti in ambito sia tecnologico che osservativo dal gruppo INAF-OAA, in collaborazione con i vari partner sia Italiani che Australiani, e le attività in corso e future, rappresentano un importante contributo al progetto. Un passo avanti verso la prossima costruzione di SKA e la futura scienza che ne deriverà.

Note

¹ <https://www.sirioantenne.it/it/>

² <https://www.idscorporation.com/>

obtained from interferometric observations during the first two years of activity of the station. Observations at six different frequencies (55, 70, 110, 160, 230, and 320 MHz) sampling the SKA-Low bandwidth have been used. Thanks to this effort, it has been possible to calibrate the data and to produce and analyze images of all the sky visible from the station. This allowed an initial validation of some crucial requirements and performances of SKA-Low: its sensitivity, the stability of the system and its calibration capabilities (Figure 2, B and C). Another activity currently ongoing aims to characterize the polarization performance of the station, which is equally important for the scientific goals of SKA. Over the next three years, six stations like AAVS2 will be built and connected together to form the first SKA-Low production prototype [13].

The technological and observational results obtained so far by the INAF-OAA group, in collaboration with the various Italian and Australian partners, and the ongoing and future activities, represent an important contribution to the project. A step forward towards the upcoming construction of SKA and the future science that will follow.

Notes

¹ <https://www.sirioantenne.it/it/>

² <https://www.idscorporation.com/>

Bibliografia

- [1] <https://www.skaobservatory.org>
- [2] <https://www.skatelescope.org/the-ska-project>
- [3] SKA Organisation, *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*, ed. SKA Organisation, (2015); <https://www.skatelescope.org/books/>
- [4] <https://italy.skatelescope.org/ska-italia/tecnologia/>
- [5] <https://sites.google.com/inaf.it/arcetriradiogroup/research-activities>
- [6] P. Bolli, L. Mezzadrelli, J. Monari et al., “*Test-Driven Design of an Active Dual-Polarized Log-Periodic Antenna for the Square Kilometre Array*”, IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 1, pp. 253-263, (2020).
- [7] P. Bolli, D. B. Davidson, M. Bercigli, et al., “*Computational electromagnetics for the SKA-Low prototype station AAVS2*”, JATIS, vol. 8, 1, 011017, (2022).
- [8] F. Paonessa, L. Ciorba, G. Virone, et al., “*SKA-Low Prototypes Deployed in Australia: Synoptic of the UAV-based Experimental Results*”, URSI Radio Science Letters, vol. 2, (2020).
- [9] G. Comoretto, R. Chiello, M. Roberts et al., “*The Signal Processing Firmware for the Low Frequency Aperture Array*”, JAI vol.6, 1, 1641015 (2017).
- [10] Baffa, C., Giani, E., Vela Nuñez, M., “*SKA Monitor and Control: Harmonization Challenges*”, ADS XXVI ASP Conference Series, Vol. 521, p.185, (2019).
- [11] Baffa, C., et al. “*SKA CSP controls: technological challenges*”, Proceedings of the SPIE, Volume 9913, id. 99132Z 7 pp. (2016).
- [12] C. Belli, G. Comoretto, “*Describing LFAA using SysML*”, SKA Project Series

Bibliography

- [1] <https://www.skaobservatory.org>
- [2] <https://www.skatelescope.org/the-ska-project>
- [3] SKA Organisation, *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*, ed. SKA Organisation, (2015); <https://www.skatelescope.org/books/>
- [4] <https://italy.skatelescope.org/ska-italia/tecnologia/>
- [5] <https://sites.google.com/inaf.it/arcetriradiogroup/research-activities>
- [6] P. Bolli, L. Mezzadrelli, J. Monari et al., “*Test-Driven Design of an Active Dual-Polarized Log-Periodic Antenna for the Square Kilometre Array*”, IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 1, pp. 253-263, (2020).
- [7] P. Bolli, D. B. Davidson, M. Bercigli, et al., “*Computational electromagnetics for the SKA-Low prototype station AAVS2*”, JATIS, vol. 8, 1, 011017, (2022).
- [8] F. Paonessa, L. Ciorba, G. Virone, et al., “*SKA-Low Prototypes Deployed in Australia: Synoptic of the UAV-based Experimental Results*”, URSI Radio Science Letters, vol. 2, (2020).
- [9] G. Comoretto, R. Chiello, M. Roberts et al., “*The Signal Processing Firmware for the Low Frequency Aperture Array*”, JAI vol.6, 1, 1641015 (2017).
- [10] Baffa, C., Giani, E., Vela Nuñez, M., “*SKA Monitor and Control: Harmonization Challenges*”, ADS XXVI ASP Conference Series, Vol. 521, p.185, (2019).

- [13] G. Macario, G. Pupillo, G. Bernardi, et al. “*Characterization of the SKA1-Low prototype station Aperture Array Verification System 2*”, JATIS, vol. 8, 1, 011014, (2022).

Giulia Macario: ricercatrice post-doc; radioastronomia a bassa frequenza.

Carlo Baffa: astronomo; strumentazione astronomica e software associato.

Carolina Belli: ricercatrice; ingegneria di sistema.

Pietro Bolli: primo tecnologo; analisi elettromagnetiche.

Simone Chiarucci: tecnologo; strumentazione digitale per radioastronomia.

Giovanni Comoretto: astronomo associato; strumentazione digitale per radioastronomia.

Paola Di Ninni: tecnologa; analisi elettromagnetiche.

Elisabetta Giani: tecnologa; strumentazione astronomica e software associato.

Georgios Kyriakou: ricercatore dottorando, analisi elettromagnetiche.

- [11] Baffa, C., et al. “*SKA CSP controls: technological challenges*”, Proceedings of the SPIE, Volume 9913, id. 99132Z 7 pp. (2016).

- [12] C. Belli, G. Comoretto, “*Describing LFAA using SysML*”, SKA Project Series.

- [13] G. Macario, G. Pupillo, G. Bernardi, et al. “*Characterization of the SKA1-Low prototype station Aperture Array Verification System 2*”, JATIS, vol. 8, 1, 011014, (2022).

Giulia Macario: post-doc researcher; low-frequency radio astronomy.

Carlo Baffa: astronomer; astronomical instruments and associated software.

Carolina Belli: researcher; system engineering.

Pietro Bolli: first technologist; electromagnetic analysis.

Simone Chiarucci: technologist; digital instrumentation for radioastronomy.

Giovanni Comoretto: associate astronomer; digital instrumentation for radioastronomy.

Paola Di Ninni: technologist; electromagnetic analysis.

Elisabetta Giani: technologist; astronomical instruments and associated software.

Georgios Kyriakou: PhD fellow, electromagnetic analysis.