

Square Kilometre Array (SKA): il radiotelescopio di nuova generazione e tecniche di multibeam

S. Montebugnoli, G. Bianchi, J. Monari, F. Perini, M. Schiaffino, G. P. Zacchioli
IRA-INAF, Bologna

G. Naldi

Dipartimento di Astronomia, Università di Bologna

Sommario—L'uso di phased array nel radiotelescopio di prossima generazione SKA (Square Kilometre Array), consentirà enormi vantaggi e possibilità osservative, come alte velocità di Sky Survey, sensibilità mai raggiunte prima in radioastronomia ed il monitoraggio di eventi transienti in grandi porzioni di cielo. La possibilità poi di sommare tutti gli elementi dell'array in più modi, renderà disponibili molti fasci di antenna orientabili indipendentemente all'interno del campo di vista (Field of View) del singolo sensore. Questo offrirà una flessibilità operativa non ottenibile con nessuna delle grandi antenne attuali: possibilità di "mappare" istantaneamente una certa zona di cielo o permettere osservazioni contemporanee a più utenti.

Parole Chiave: Array, Beamforming, Multibeaming, Radioastronomia.

INTRODUZIONE

Lo Square Kilometre Array [1] consentirà ai radioastronomi di domani di osservare il cielo radio tramite uno strumento rivoluzionario da un chilometro quadrato di area collettrice (1000000 m^2), formato da una miriade di sottostazioni distribuite su di un'area di 3000 Km di diametro. SKA permetterà l'osservazione di lontanissime regioni mai esplorate dell'Universo, consentirà di definire con precisione il campo di applicazione di teorie moderne della Gravità e della Teoria della Relatività Generale di Einstein. Prospetterà per la prima volta la possibilità concreta di individuare nell'universo tracce di vita intelligente e qualsiasi altro evento transiente che si potrà manifestare in cielo. SKA realizzerà tutto questo, non solo attraverso la disponibilità di una enorme area di raccolta, ma soprattutto attraverso l'implementazione di moderne tecnologie di beam forming. Grazie a questi sofisticati metodi di elaborazione digitale del segnale sarà possibile orientare il fascio di antenna in più direzioni contemporaneamente, realizzando una sorta di gigantesco "occhio panoramico" a frequenze radio. Per implementare questa caratteristica, la superficie di raccolta di SKA sarà composta da un numero elevatissimo di elementi discreti (siano essi semplici radiatori, come dipoli o antenne Vivaldi, o singole

superfici paraboliche di medie dimensioni, o altre configurazioni), dotati ognuno di un proprio elemento attivo e di una propria catena di ricezione, connessi in tempo reale attraverso fibre ottiche, complessi sistemi digitali e matrici di supercalcolatori, una sorta di "retina digitale" di grandi dimensioni di questo gigantesco "occhio radio". Sensibilità mai raggiunte prima (area di raccolta equivalente a 13 antenne di Arecibo), poteri risolutivi di millesimi di secondo d'arco, bande istantanee fino a 4 GHz e una grande quantità di fasci di antenna orientabili separatamente all'interno del FoV del singolo sensore sono tra le sue caratteristiche principali. Le enormi larghezze di banda osservabile (0.1-20 GHz) richieste dai radioastronomi portano gli ingegneri a progettare uno strumento ibrido, formato cioè da elementi di antenne che coprono bande contigue fino alla copertura totale di quella richiesta. Operare su bande larghe (cioè non solo su quelle riservate alla radioastronomia) porta poi ad essere esposti alle interferenze radio (Radio Frequency Interferences). Questo significa progettare front-end a basso rumore, basso costo e alta dinamica, convertitori analogico/digitali con molti bit (elevato numero di livelli di quantizzazione) e necessità di formare fasci di antenna in maniera adattiva, in modo da mitigare le RFIs. Per verificare i concetti che stanno alla base di SKA e sviluppare le tecnologie necessarie, in tutto il mondo si stanno preparando banchi di prova usando (quando possibile) gli attuali radiotelescopi o costruendone ex novo come EMBRACE, il dimostratore europeo assemblato in Olanda, l'americano ATA, l'australiano NTD, il sudafricano KAT e tanti altri. A livello italiano la Croce del Nord, con i suoi 5632 dipoli, si presta benissimo ad una re-ingegnerizzazione [2],[3],[4],[5],[6], anche se parziale per motivi legati alla limitatezza dei fondi a disposizione, che permette di ottenere 3 dimostratori di dimensioni crescenti per numero di ricevitori e area di raccolta, per limitare al massimo i rischi legati alla progettazione, nella banda $408 \text{ MHz} \pm 8 \text{ MHz}$:

- BEST-1 **170** m^2 N=4 ricevitori (2006)
- BEST-2 **1360** m^2 N=32 ricevitori (2007)
- BEST-3 **7400** m^2 N=80 ricevitori (2008)

Lo studio del concetto di SKA europeo (SKADS) e la progettazione dei banchi di prova e di sviluppo delle relative tecnologie è finanziato, oltre che dalle istituzioni di ricerca nazionali, nell'ambito del Sesto Programma quadro Design Study della UE (FP6 DS), con 10.4 ME ripartiti all'interno del consorzio

I. LO SQUARE KILOMETRE ARRAY

Considerando le enormi dimensioni fisiche in termini di baseline e l'elevata esposizione alle RFI, lo strumento sarà probabilmente costruito in Australia o in Sud Africa. La banda viene al momento concepita come separata in tre grandi sottobande: 0.1–0.3 GHz (tecnologia LOFAR → Low Frequency Aperture Array Olandese), 0.3–1000 MHz (Planar Aperture Array sviluppato in ambito europeo) e 0.7-20 GHz (parabole da 6 m di diametro, tecnologia Allen Telescope Array americano). Le principali caratteristiche sono:

- **Frequenza Istantanea:** 100 MHz - 20 GHz (Goal: 60 MHz - 35 GHz)
- **Bande simultanee di osservazione:** 2 (2 polarizzazioni)
- **Banda Istantanea (BW) per ciascuna banda di osservazione:** 25% della frequenza centrale della banda a cui si osserva, fino ad un max di 4 GHz per frequenze superiori a 16 GHz
- **Capacità di Beamforming:** 50 beams simultanei (phased array) all'interno del FoV
- **Sensibilità a 45 gradi di elevazione (Aeff/Tsys m²/K):** 2500@60 MHz, 5000@200 MHz, 20000 nella banda 0.5-5 GHz, 15000@15 GHz, e 10000@20 GHz

Un primo schema a blocchi e l'architettura del nucleo (core) di SKA allo stato attuale del progetto [7], vengono riportati in Fig. 1, Fig 2 e Fig.3.

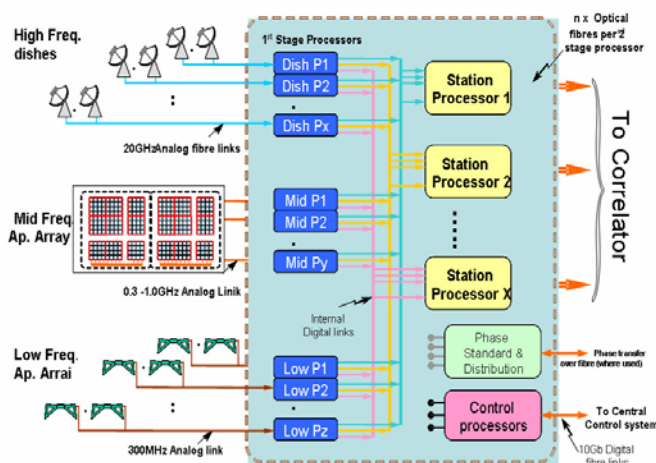


Fig. 1: schema a blocchi del sistema allo stato attuale della progettazione

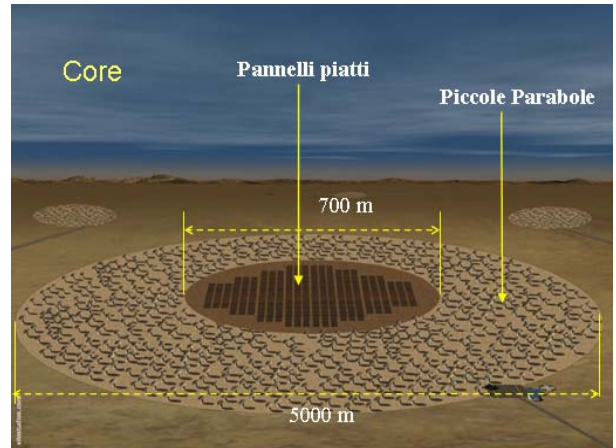


Fig. 2: concezione attuale nucleo di SKA

La parte centrale (radio fish eye di 700 m di diametro) è un aperture array composto da pannelli piatti (0.3–1000 MHz) di 1 m² composti ognuno da 64 antenne Vivaldi opportunamente combinate per formare due fasci di antenna ciascuna. La parte esterna al core (0.7-20 GHz) è formata da parabole di 6 m sparse su di una zona di 5 Km di diametro.



Fig. 3: vista pittorica ravvicinata del core

Allo stato attuale la configurazione di base dello strumento nella sua globalità è quella riportata in Fig.4. Le sottostazioni sono formate da sole parabole di 6 m di diametro, distribuite lungo rami di spirale con distanze massime di 3000 Km.

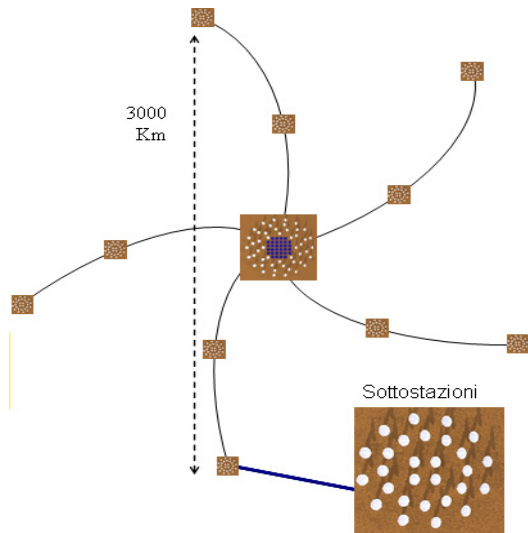


Fig. 4: ipotesi di vista d'insieme dell'array.

Vista l'enorme quantità di elettronica necessaria per la costruzione di SKA, la grande sfida è quella della riduzione dei costi unita però ad un drammatico incremento delle performance dei dispositivi. Questo sarà reso possibile solo dallo sviluppo di nuove tecnologie in grado di sostenere larghezze di banda e flussi di dati digitali impressionanti. Per avere un'idea di questo, consideriamo come esempio [8] 256 elementi d'antenna (4 pannelli, due polarizzazioni) all'interno del radio *fish eye* (Fig.5) nella configurazione in cui si pensa di realizzarlo. A livello di elaborazione on-line dei dati digitali, occorrerebbero circa 20 TMac (Tera Multiplication and accumulation per second).

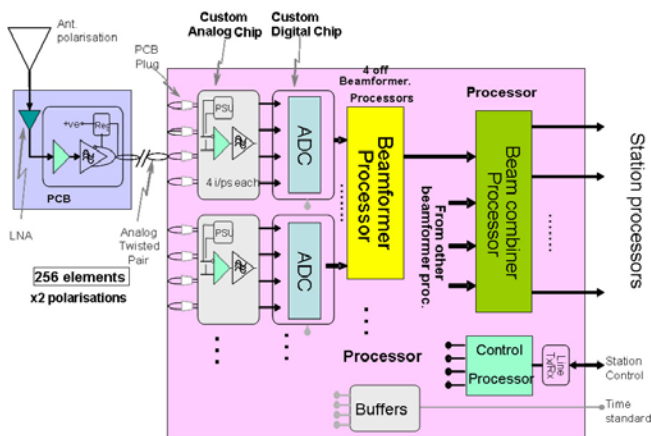


Fig. 5: 256 sensori (2 pol.) e relativo processing dei Planar Array

Allo stato attuale della tecnologia non sarebbe possibile raggiungere la capacità di calcolo richiesta da tutto l'array! Si suppone però che nel 2011 (anno in cui inizierà la costruzione dello strumento) queste performance siano raggiunte usando tecnologie avanzate tipo la 45nm silicon technology (chip custom). Continuando con l'esempio sopra riportato, il primo enorme carico computazionale è

rappresentato dalla suddivisione di bande molto larghe in migliaia di canali spettrali. Il segnale dei singoli canali spettrali corrispondenti in ciascun ricevitore, viene corretto per un time delay, una fase ed una ampiezza appropriati. Nell'attuale concezione del core, la formazione del beam, per ogni singolo canale spettrale viene eseguita con l'implementazione di una 2-D Fast Fourier Transform (FFT) per ogni blocco di 8x8 elementi. Questo produce la disponibilità di 64 beams, di cui ne verranno effettivamente utilizzati solo da 8 a 16. I beams richiesti per l'imaging della parte di cielo "vista" dal singolo elemento (FOV) si ottengono interpolando vari beams adiacenti ottenuti anche questi con tecniche FFT. Questi Sky beams (combinati inizialmente in gruppi di 4 tiles da 256 elementi) sono poi combinati con le rimanenti 300 tiles del radio fish eye nel Beam Combiner Processor.

II. MULTIBEAM

Il potere operare con molti beam contemporaneamente rappresenta un grande vantaggio. Lo stesso osservatore può investigare più target allo stesso tempo o svariati ricercatori possono osservare parallelamente ciascuno il proprio target. Il principio del multibeam è riportato schematicamente in Fig.6 dove risulta anche evidente come la creazione dei beams avvenga in maniera adattiva, cioè uno o più zeri del pattern di radiazione vengono orientati nella direzione di provenienza delle interferenze. Questo metodo implementa un filtraggio spaziale molto efficace nella mitigazione di stazioni interferenti sia terrestri, sia spaziali (vedasi il satellite nella stessa Fig.6).

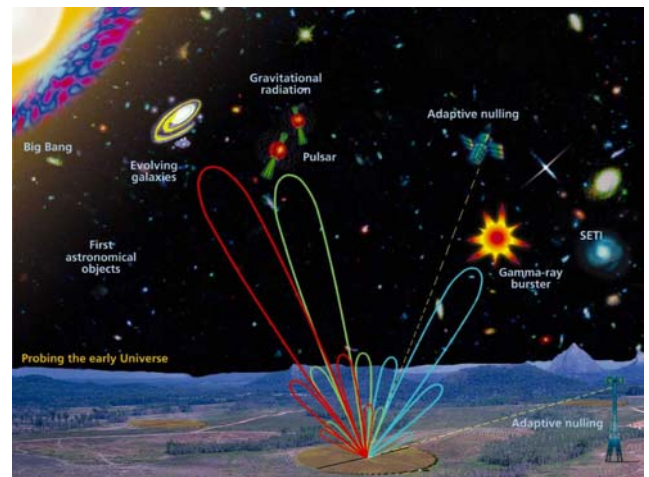


Fig 6: principio di base del Multibeam

Oltre al metodo della 2-D FFT considerato prima, si possono creare molti beams sommando (con determinate fasi ed ampiezze) i diversi sensori che costituiscono l'array (Direct Beamforming). Se si hanno 2 catene collegate in modo opportuno allo stesso array di sensori, si possono avere 2 fasci, come in Fig.7, che puntano parti diverse di cielo. Se si implementano N catene si possono

ottenere N fasci. In tutti i casi il blocco “data processing” deve essere in grado di fornire la capacità computazionale richiesta.

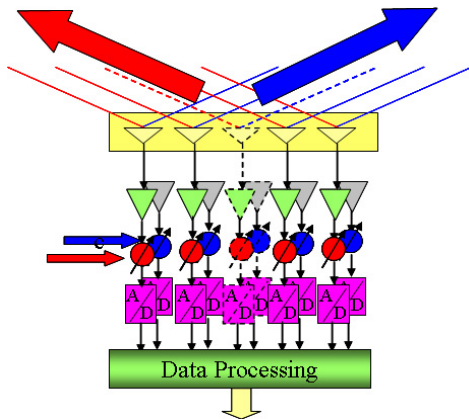


Fig. 7: Due fasci d’antenna ottenuti con lo stesso array di sensori

Per puro esercizio calcoliamo il numero di operazioni al secondo necessarie per 50 fasci d’antenna nel caso di 1 milione di ricevitori con 1 GHz di banda:

$$1\text{GHz} \rightarrow \text{BW} = 2\text{GS/sec} \text{ (Nyquist)}$$

$$8 \text{ bit} \rightarrow 16 \text{ Gb/sec} \times 1.000.000 = (16.000 \text{ Tb/s})/\text{ric.}$$

Considerando che per il Direct Beamforming occorrono:

$$(8N_{\text{rx}} - 2) \text{ BW (Operazioni /sec)/beam,}$$

per 50 beam occorrono 4×10^{17} Operazioni/sec!

Ci si può immaginare quale possa essere l’entità della mole di dati da trasportare (fibra ottica) e gestire, nel caso in cui SKA, nella sua versione definitiva, operi a piena banda 0.3-20 GHz! Il problema dell’handling dei dati si complica ulteriormente se si considera la dinamica (numero di livelli di quantizzazione) richiesta ai convertitori A/D per potere “descrivere”, senza saturare, le enormi quantità di radio interferenze presenti in bande di questo genere. Per questo motivo è fondamentale che parallelamente alla progettazione di SKA vi sia uno sviluppo intensivo di strategie e di algoritmi per la mitigazione e/o cancellazione delle interferenze radio.

III. CONCLUSIONI

Le risposte alle domande dell’astrofisica moderna verranno date da SKA, uno strumento rivoluzionario con grandi sensibilità e potere risolutore, fasci di antenna multipli che ne permetteranno l’uso contemporaneo da parte di tutta la comunità scientifica, possibilità di mitigare le radio interferenze ed una enorme flessibilità d’uso. Per la costruzione di tale strumento si dovranno affrontare grandi sfide tecnologiche. Per questo motivo tutte le istituzioni di ricerca del settore a livello internazionale stanno sviluppando banchi di prova per la verifica dei concetti che stanno alla base di SKA e per lo sviluppo delle nuove tecnologie necessarie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Overview of SKA Engineering” Experimental Astronomy, edited by P.Hall, Vol.17 Nos 1-3,2004, www.skatelescope.org
- [2] "Italian SKA test bed based on cylindrical antennas", S. Montebugnoli, G. Bianchi, C. Bortolotti, A. Cattani, A. Cremonini, A. Maccaferri, F. Perini, M. Roma, J. Roda, P. Zacchiroli. Published on Astronomische Nachrichten, Volume 327, Issue 5-6 (p 624-625), May 11, 2006:
- [3] "Large antenna array remoting using radio-over-fiber techniques for radio astronomical application", S. Montebugnoli, M. Boschi, F. Perini, P. Faccin, G. Brunori and E. Pirazzini. Published on the Microwave and Optical Technology letters / Vol. 46, No. 1, July 5, 2005:
- [4] “Distributore di segnali di sincronismo e clock in logica PECL e LVDS tramite PLL” Università degli studi di Bologna, Tirocinio di primo livello di Ingegneria delle Telecomunicazioni. Tirocinante: Giovanni Battista Montanari. Insegnamento: Sistemi a portante ottica L-A. Tutor: Prof. G.Tartarini Responsabili: S.Montebugnoli, G.Bianchi. September 15, 2005
- [5] "Description of a rigorous procedure to evaluate the antenna temperature and its application to BEST-1", P. Bolli, F. Perini, S. Montebugnoli, G. Pelosi IRA Technical Report N. 377/05 December 15, 2005
- [6] “Progettazione e descrizione dello schema di lavoro per modifiche meccaniche linee Nord/Sud del radiotelescopio Croce del Nord” Università degli studi di Bologna, Il Facoltà di Ingegneria con sede a Cesena, sede di Forlì Tirocinio di primo livello di Ingegneria Meccanica. Tirocinante: Marco Schiaffino. Tutor: Prof. L.Piancastelli -Responsabili: S.Montebugnoli, F.Perini, A.Cattani. February 2006:
- [7] Several papers at the www.skatelescope.org site
- [8] “Design consideration for a SKA quality, cost effective phased aperture array” A.J.Faulkner, M.E.Jones, P.Alexander, D.Kant, P. Patel, P.Picard,R.Keller, S. Montebugnoli EMTS, Ottawa Canada, July 2007 (in progress)