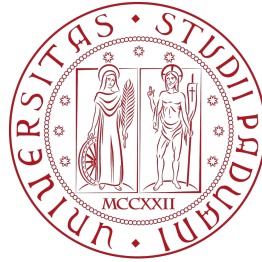


UNIVERSITÀ DI PADOVA



Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

Tesi di Laurea Triennale

Antenne per Radioastronomia

Panoramica caratteristiche e tipologie impianti

Relatore

prof. Andrea Galtarossa

Laureando

Nicholas Zenti

Settembre 2023

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Storia	1
1.2	Classificazione delle radiosorgenti	3
1.3	Come vengono generate le onde radio dal nostro universo	6
1.3.1	Emissioni termiche	8
1.3.2	Emissioni non termiche	9
2	Antenne	10
2.1	Onde elettromagnetiche	10
2.1.1	Equazioni Maxwell	10
2.2	Dipolo Elementare	11
2.3	Parametri fondamentali	14
2.3.1	Direttività	14
2.3.2	Guadagno	14
2.3.3	Area efficace	15
2.4	Diagrammi di radiazione	16
2.5	Caratteristiche antenne per radioastronomia	18
2.5.1	Riflettori parabolici	22
2.6	Interferometria	25

3	Panoramica impianti più importanti	27
3.1	Very Large Array - VLA	27
3.2	Square Kilometer Array (SKA)	29
3.2.1	SKA-Low	30
3.2.2	SKA-Mid	32
3.3	Osservatorio astronomico di Medicina	33
3.3.1	Radiotelescopio G. Grueff	36
	Riferimenti bibliografici	38

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Storia

Come è nata la Radioastronomia? Come spesso avviene nella scienza, la nascita di un nuovo settore è direttamente collegato al lavoro svolto in altri ambiti. Karl Jansky, un ingegnere delle Telecomunicazioni, costruì uno strumento in grado di analizzare i rumori di origine naturale che disturbavano le radiotrasmissioni commerciali transoceaniche, senza sapere nulla di Astronomia. Il sistema da lui costruito aveva caratteristiche perfette per rivelare le radioemissioni naturali provenienti dal centro della nostra galassia, dopo uno studio approfondito di nozioni di astronomia riuscì ad inquadrare l'origine e la provenienza di quelle strane emissioni. Jansky concluse che questi segnali provenivano dalla Via Lattea e che erano più forti in direzione del centro della galassia, nella costellazione del Sagittario. Successivamente Grote Reber, ingegnere e appassionato radioamatore, perfezionò il sistema costruito da Jansky adattando abilmente i circuiti del radioricevitore e la struttura del sistema d'antenna alle esigenze imposte dalla registrazione dei deboli segnali cosmici di origine naturale; egli compilò la prima radiomappa della nostra galassia e descrisse le caratteristiche tecniche basilari dei radiotelescopi, anche se non fu in grado di spiegare tutta la fenomenologia associata ai meccanismi emissivi delle

radiosorgenti. Sperimentatore dilettante, Reber fornì i parametri progettuali per la costruzione di un vero radiotelescopio, evidenziando la capacità dello strumento di misurare la temperatura di brillanza degli oggetti cosmici "visti" dal fascio di ricezione dell'antenna. Da allora fino ai nostri giorni la storia della radioastronomia è stata caratterizzata da una continua successione di scoperte. Tale evoluzione si è resa possibile grazie allo sviluppo tecnologico dell'elettronica, dei sistemi di antenne e dei computer. L'evoluzione del software ha prodotto un miglioramento delle tecniche di elaborazione, rendendo possibile il perfezionamento della nostra visione dell'universo più lontano. Lo sviluppo tecnologico degli strumenti radioastronomici è stato superiore a quello di molte altre discipline scientifiche: fra i temi basilari che hanno contrassegnato tale crescita si possono citare l'aumento in sensibilità dei dispositivi riceventi, il miglioramento nella copertura spettrale ed il progressivo incremento nella risoluzione angolare dei radiotelescopi. Nell'astronomia sperimentale i tradizionali "portatori" dell'informazione sono i fotoni (che abbracciano l'intero spettro elettromagnetico): a questi si aggiungono altri "messaggeri cosmici" che hanno reso possibile lo sviluppo della cosiddetta astronomia delle particelle (neutrini, elettroni, protoni, raggi cosmici). Il tipo di fotoni prodotti dipende dalle condizioni fisiche prevalenti che caratterizzano le sorgenti, dalla natura delle particelle radianti e da una serie di variabili macroscopiche (temperatura e pressione), oltre che dalla loro dinamica e dalla presenza di campi magnetici. La radioastronomia studia i corpi celesti rivelando ed analizzando le loro radiazioni elettromagnetiche emesse nell'intervallo spettrale delle radioonde (la cosiddetta finestra hertziana), costituendo una delle branche più potenti e feconde dell'astronomia. Le differenze di potenziale elettrico indotte negli apparati riceventi dalla radiazione celeste non contengono alcuna "informazione", se a questo termine si attribuisce l'usuale significato al quale ci hanno abituato le telecomunicazioni. I segnali originati dai processi naturali mostrano un'evoluzione temporale con caratteristiche simili a quelle di un rumore elettrico, presentandosi come una serie di impulsi molto stretti ad occorrenza aleatoria, il cui

involuppo riproduce una forma d'onda avente distribuzione tipica delle ampiezze che segue una statistica gaussiana. L'energia elettromagnetica raccolta dal sistema d'antenna di un radiotelescopio non è quindi immediatamente misurata, ma amplificata e manipolata coerentemente preservando il suo carattere ondulatorio, infine rivelata. Il processo di rivelazione non riesce a determinare la fase del segnale originario, restituendo un'uscita proporzionale al quadrato dell'ampiezza del segnale ricevuto, quindi proporzionale alla sua potenza.

1.2 Classificazione delle radiosorgenti

È ben noto come il mezzo attraversato influenzi notevolmente la propagazione dei fotoni: i fenomeni emissivi e di assorbimento del mezzo evidenziano marcate caratteristiche di filtraggio in corrispondenza di alcune regioni dello spettro elettromagnetico. Le traiettorie seguite dai fotoni dipendono, d'altra parte, oltre che dalle caratteristiche elettriche e magnetiche del mezzo, anche dalla curvatura locale dell'universo, quindi dalla distribuzione locale di materia (è nota la capacità posseduta da una grande massa di modificare la traiettoria dei fotoni: il cosiddetto effetto lente gravitazionale previsto dalla teoria di Einstein). La radiazione che giunge all'osservatore reca, quindi, l'impronta delle caratteristiche della sorgente e del mezzo attraversato. L'atmosfera terrestre costituisce una barriera per i fotoni cosmici interposta fra la sorgente celeste e l'osservatore, limita le osservazioni essenzialmente a due finestre dello spettro elettromagnetico, quella compresa tra circa 0.3 e 0.8 micrometri (finestra visibile, con ampiezza pari a circa un'ottava) e quella compresa tra circa 1 centimetro e 1 metro di lunghezza d'onda (finestra radio, con ampiezza superiore a 10 ottave). Tali valori sono nominali, dato che si verificano occasionali aperture dello schermo ionosferico (alle basse frequenze), rendendo possibili ricezioni fino alle lunghezze d'onda di 150-200 metri. La troposfera manifesta

la sua relativa ed occasionale trasparenza anche alle lunghezze d'onda millimetriche. Con lo sviluppo delle tecnologie spaziali si è aperta la possibilità di condurre osservazioni astronomiche all'esterno dell'atmosfera terrestre mediante satelliti artificiali, ampliando notevolmente gli orizzonti di sperimentazione sull'intero spettro elettromagnetico, dai raggi gamma ad alta energia fino alle onde radio di frequenza molto bassa. I dati acquisiti da stazioni orbitanti spaziali presentano caratteristiche e prospettive uniche: sono assenti gli effetti dell'assorbimento, della rifrazione e del rumore atmosferico ed appaiono notevolmente ridotti gli effetti delle interferenze causate dai trasmettitori terrestri che rendono difficoltosa la convivenza fra gli apparati per telecomunicazioni commerciali ed i sensibili strumenti radioastronomici. Ulteriore ed interessante possibilità è quella che prevede l'installazione di stazioni radioastronomiche sulla faccia nascosta della Luna; operando durante la notte lunare si annullerebbero gli effetti delle interferenze terrestri e si minimizzerebbero i disturbi dovuti all'intensa radioemissione solare. È impossibile rivelare la radiazione

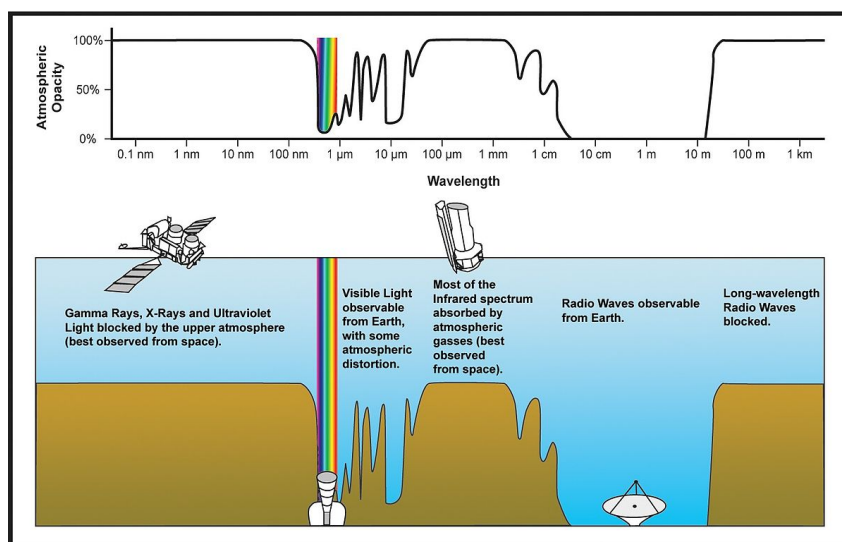


Figura 1.1: Schematizzazione delle "finestre" di trasparenza atmosferica

di un oggetto cosmico pensando di ottenere la totalità delle informazioni spettrali con l'impiego di una singola tecnologia. L'astronomia si è quindi specializzata in

numerosi settori paralleli (astronomia ottica, astronomia gamma o X, astronomia infrarossa, radioastronomia) sviluppando tecniche strumentali che utilizzano tecnologie molto differenti per ogni settore. Lo studio del cosmo in una sola banda di frequenze non è sufficiente a caratterizzare completamente la natura: occorre sviluppare una metodologia d'indagine sperimentale di tipo interdisciplinare, in modo che tutte le informazioni provenienti dai vari settori, complementari tra loro, conducano, insieme, ad una visione corretta del fenomeno in studio. La possibilità di analizzare la radiazione elettromagnetica nelle varie porzioni dello spettro dipende dalla capacità tecnica di sviluppare rivelatori abbastanza sensibili ed efficienti entro la banda di frequenze che interessa: la radioastronomia non fa eccezione, essendosi pienamente sviluppata solo quando la conoscenza dell'elettromagnetismo e delle sue applicazioni tecnologiche lo hanno consentito. Nella figura 1.2 è rappresentato lo spettro elettromagnetico, con la relativa nomenclatura tradizionale (proveniente dal settore delle telecomunicazioni). La divisione e la nomenclatura delle gamme di frequenze è stabilita dalla ITU (International Telecommunication Union).

Designazione ITU		
banda	frequenze	lunghezza d'onda
ELF	3 – 30 Hz	100 000 km – 10 000 km
SLF	30 – 300 Hz	10 000 km – 1000 km
ULF	300 – 3000 Hz	1000 km – 100 km
VLF	3 – 30 kHz	100 km – 10 km
LF	30 – 300 kHz	10 km – 1 km
MF	300 – 3000 kHz	1000 m – 100 m
HF	3 – 30 MHz	100 m – 10 m
VHF	30 – 300 MHz	10 m – 1 m
UHF	300 – 3000 MHz	1000 mm – 100 mm
SHF	3 – 30 GHz	100 mm – 10 mm
EHF	30 – 300 GHz	10 mm – 1 mm
THF	300 – 3000 GHz	1 mm – 0.1 mm

Figura 1.2: Suddivisione e nomenclatura nelle varie gamme di frequenza

1.3 Come vengono generate le onde radio dal nostro universo

Un oggetto cosmico che irradia energia elettromagnetica nella regione radio dello spettro è genericamente chiamato radiosorgente. Le caratteristiche fisiche dell'oggetto, la distanza dalla Terra, la sua estensione nello spazio ed i meccanismi di radiazione possono essere molto diversi ma ci sono due tipologie fondamentali: emissione termica e non termica. Il meccanismo di radiazione termica è una conseguenza del fatto che l'oggetto possiede una temperatura superiore allo zero assoluto: in teoria, in accordo con la legge di Planck, tutti i corpi irradiano per effetto termico con maggiore o minore efficienza, secondo la loro temperatura fisica e la loro capacità di assorbimento. La radiazione visibile del Sole, quella radio del Sole quieto e della corona sono esempi di emissione termica. I meccanismi di emissione che non rientrano nella tipologia di radiazione termica sono genericamente chiamati di tipo non termico. Si tratta, ad esempio, della radiazione del Sole perturbato, delle sorgenti come le radiogalassie ed il gas interstellare lontano dalle stelle calde: in tutti questi casi si registrano emissioni con energia paragonabile alla radiazione di un corpo nero con temperatura fisica notevolmente superiore a quella reale dell'oggetto emittente. Devono allora esistere meccanismi molto diversi dall'agitazione termica degli atomi e degli elettroni in grado di produrre energie molto grandi, anche a temperature fisiche relativamente basse. L'origine di tali emissioni è stata spiegata con fenomeni quali la radiazione di sincrotrone e l'oscillazione del plasma. È opportuno evidenziare alcuni aspetti peculiari, in un'ottica tipicamente strumentale, che semplificano la comprensione della natura dei segnali rivelabili con un radiotelescopio. Un oggetto in grado di produrre radiazione misurabile deve essere particolarmente efficiente, oppure relativamente vicino, oppure abbastanza grande. Il Sole è la radiosorgente più intensa e facilmente ricevibile da Terra, non tanto per la sua intrinseca efficienza radiativa o per la sua estensione, quanto per la vicinanza. Numerosi sono stati i

tentativi, agli albori della radiotecnica, di ricevere le radioonde solari, tutti senza successo a causa della scarsa sensibilità degli apparati dell'epoca. Lo sviluppo delle tecniche radar durante la Seconda guerra mondiale ha contribuito allo sviluppo della radioastronomia, fornendo gli strumenti e le tecniche adatte per lo studio della radiazione cosmica; fu proprio grazie ai radar militari che si riuscì ad identificare con sicurezza la radioemissione solare.

1.3.1 Emissioni termiche

La legge di Planck è una legge fondamentale della fisica che descrive lo spettro di radiazione emessa da un corpo nero (un oggetto che assorbe tutta la radiazione che incide su di esso) a una data temperatura. La legge di Planck afferma che l'energia della radiazione elettromagnetica emessa da un corpo nero è proporzionale alla frequenza della radiazione stessa. In altre parole, a temperature elevate, il corpo nero emette principalmente radiazioni di alta frequenza, come la luce visibile, mentre a temperature più basse emette principalmente radiazioni di bassa frequenza, come le onde radio. Inoltre, la legge di Planck stabilisce che la radiazione emessa da un corpo nero ha una distribuzione spettrale di energia che dipende solo dalla temperatura del corpo nero e dalla costante di Planck, che è una costante fondamentale della fisica quantistica. Questa distribuzione spettrale viene chiamata distribuzione di Planck ed è importante per la comprensione di fenomeni come l'effetto fotoelettrico e la radiazione di corpo nero.

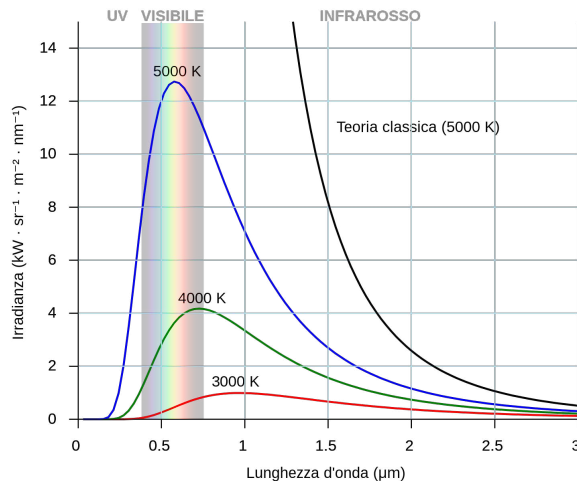


Figura 1.3: Irraggiamento termico del corpo nero, legge della radianza spettrale (di Rayleigh-Jeans e di Planck)

1.3.2 Emissioni non termiche

Oltre alle emissioni di radiazione termica, che sono prodotte dalla temperatura delle stelle, esistono anche emissioni di radiazione non termiche, che sono prodotte da processi ad alta energia. Una delle principali fonti di radiazione non termica nell'universo sono le stelle di neutroni e le pulsar. Questi oggetti sono estremamente densi e magnetizzati e producono intensi campi magnetici che accelerano le particelle cariche presenti nell'ambiente circostante, come elettroni e protoni, ad altissime velocità. Questi processi di accelerazione producono radiazione non termica sotto forma di raggi X e raggi gamma. Un'altra fonte importante di radiazione non termica sono i buchi neri. Quando la materia cade all'interno di un buco nero, viene riscaldata ad altissime temperature e produce radiazione non termica sotto forma di raggi X e raggi gamma. In generale, le emissioni di radiazione non termica sono associate a processi ad alta energia, come la fusione di particelle, l'accelerazione di particelle cariche e la caduta di materia nei buchi neri.



Figura 1.4: Prima foto storica di un buco nero

Capitolo 2

Antenne

Le antenne sono dispositivi che trasmettono e ricevono onde elettromagnetiche; il loro principio di funzionamento si basa sul fatto che quando un campo elettrico varia nel tempo, viene generato un campo magnetico e viceversa. Questa relazione tra campo elettrico e campo magnetico è descritta dalle equazioni di Maxwell. La forma e le dimensioni dell'antenna influenzano la sua efficacia nel trasmettere e ricevere segnali. Le antenne più comuni, come le antenne dipolo hanno una forma allungata e rettilinea, ma esistono anche antenne a forma di parabola, a elica e molte altre.

2.1 Onde elettromagnetiche

2.1.1 Equazioni Maxwell

Lo studio delle antenne si basa sulla teoria della radiazione elettromagnetica e sullo studio dei campi elettromagnetici generati da sorgenti in un mezzo isotropo, omogeneo ed illimitato (spazio libero). Il comportamento è descritto dalle note equazioni di Maxwell.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla \times \bar{E} = -j\omega\mu\bar{H} & \text{(Legge di Faraday)} \\ \nabla \times \bar{H} = +j\omega\epsilon\bar{E} + \bar{J} & \text{(Legge di Ampere-Maxwell)} \\ \nabla \cdot \bar{D} = \rho & \text{(Legge di Gauss)} \\ \nabla \cdot \bar{B} = 0 & \text{(Legge di Gauss)} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Dove:

μ : permeabilità magnetica del mezzo [H/m]

ϵ : permittività dielettrica del mezzo [F/m]

ρ : densità di carica [C/m^2]

\bar{J} : densità di corrente elettrica [A/m^2]

2.2 Dipolo Elementare

Calcoliamo ora il campo elettromagnetico irradiato da un dipolo elettrico elementare, antenna con lunghezza molto minore di λ sulla quale si può ipotizzare una distribuzione spaziale di corrente costante. Si consideri un elemento ideale di corrente di lunghezza δ_z lungo la quale scorre una corrente con ampiezza costante I rispetto a z .

In un sistema di coordinate sferiche risulta:

$$\bar{J} = I \delta(x) \delta(y) f(z) \hat{z}, \quad (2.2)$$

con:

$$f(x) = \begin{cases} 1; & |z| \leq \Delta_z/2 \\ 0; & |z| > \Delta_z/2. \end{cases} \quad (2.3)$$

Essendo un elemento infinitesimo posto nell'origine del sistema di riferimento conviene lavorare in un sistema di riferimento sferico. Risolvendo le equazioni di Maxwell per il dipolo elementare si ottiene, come si può vedere in 2.4, una semplificazione

in base a se si vuole considerare un campo lontano o vicino

$$\begin{aligned}
 E_\theta &= \eta \frac{I\Delta z}{4\pi} \left(\underbrace{jk + \frac{1}{R}}_{\text{Campo lontano}} + \underbrace{\frac{1}{jkR^2}}_{\text{Campo vicino}} \right) \sin \vartheta \frac{e^{-jkR}}{R} \\
 E_r &= \eta \frac{I\Delta z}{2\pi} \left(\underbrace{0}_{\text{Campo lontano}} + \underbrace{\frac{1}{R} + \frac{1}{jkR^2}}_{\text{Campo vicino}} \right) \cos \vartheta \frac{e^{-jkR}}{R} \\
 H_\phi &= \frac{I\Delta z}{4\pi} \left(\underbrace{jk + \frac{1}{R}}_{\text{Campo lontano}} + \underbrace{0}_{\text{Campo vicino}} \right) \sin \vartheta \frac{e^{-jkR}}{R}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

È ora utile calcolare il vettore di Poynting

$$\bar{S} = \frac{1}{2} \bar{E} \times \bar{H}^* = \frac{1}{2} (E_\theta \hat{\theta} + E_r \hat{r}) \times (H_\phi^* \hat{\phi}) = \frac{1}{2} E_\theta H_\phi^* \hat{r} + \frac{1}{2} E_r H_\phi^* \hat{\theta} \tag{2.5}$$

Il flusso su una sfera di raggio R con centro sull'antenna fornisce la sequenza potenza irradiata:

$$P_{rad} + jQ_{rad} = \int_S \bar{S} \cdot \hat{r} ds = \frac{1}{2} \int_S E_\theta H_\phi^* R^2 \sin \theta d\theta d\phi = |I|^2 \eta \left(\frac{\Delta z}{\lambda} \right)^2 \frac{\pi}{3} \left[1 - j \left(\frac{\lambda}{2\pi R} \right)^3 \right]. \tag{2.6}$$

Si può notare che la potenza attiva irradiata è indipendente dalla distanza, mentre quella reattiva è trascurabile se $R \gg \lambda$, ovvero se ci troviamo in campo lontano, mentre domina in campo vicino ($R \ll \lambda$).

Possiamo ora ipotizzare di trovarsi in campo lontano in un mezzo privo di perdite e calcolare quindi i vari parametri del dipolo elementare. Come possiamo vedere in figura 2.4 dove sono state calcolate le equazioni di Maxwell per il dipolo, in campo lontano risulta:

$$\begin{cases} E_\theta \cong \eta \frac{jkI\Delta z}{4\pi} \sin \theta \frac{e^{-jkR}}{R} \\ E_r = 0 \\ H_\phi \cong \frac{jkI\Delta z}{4\pi} \sin \theta \frac{e^{-jkR}}{R}. \end{cases} \tag{2.7}$$

In campo lontano quest'onda sferica può essere approssimata ad un'onda piana uniforme, con componenti di campo elettrico e magnetico ortogonali tra loro, nello spazio, in fase e in tempo.

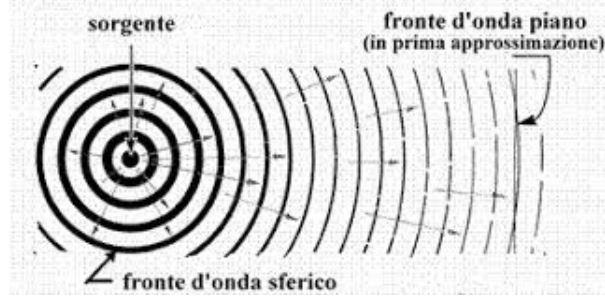


Figura 2.1: Approssimazione onda sferica in campo lontano

Il vettore di Pointing risulta facile da calcolare essendo le due componenti ortogonali:

$$\vec{S} = \frac{1}{2}(\vec{E} \times \vec{H}^*) = S \hat{r} \quad (2.8)$$

$$S(R, \theta) = \left(\frac{nk^2 |I|^2 \Delta_z^2}{32\pi^2 R^2} \right) \sin^2 \theta = S_0(R) \sin^2 \theta$$

Si definisce intensità di radiazione normalizzata $F(\theta, \phi)$ il rapporto, ad una data distanza R dall'antenna, tra la densità di potenza $S(R, \theta, \phi)$ ed il suo valore massimo:

$$F(\theta, \phi) = \frac{S(R, \theta, \phi)}{S_{MAX}}. \quad (2.9)$$

In questo caso (dipolo in spazio libero) risulta:

$$S_{MAX} = S_0(R) = \left(\frac{nk^2 |I|^2 \Delta_z^2}{32\pi^2 R^2} \right) = \frac{15\pi |I|^2}{R^2} \left(\frac{\Delta_z}{\lambda} \right)^2 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.10)$$

$$F(\theta, \phi) = F(\theta) = \sin^2 \theta. \quad (2.11)$$

2.3 Parametri fondamentali

2.3.1 Direttività

Si definisce Direttività di un antenna il rapporto tra il valore massimo dell'intensità di Radiazione e il valore medio di $F(\Theta, \Phi)$.

$$D = \frac{F_{max}}{F_{av}} = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} F(\Theta, \Phi) d\Omega} > 1 \quad (2.12)$$

Un'antenna in grado di emettere la stessa intensità in tutte le direzioni avrebbe $D=1$ (antenna isotropa); tale antenna non esiste per limiti imposti dalla fisica.

Molto utile per i calcoli la relazione seguente, che lega direttività, densità di potenza nella direzione del massimo di radiazione e potenza irradiata totale.

$$D = \frac{4\pi R^2 S_{max}}{P_{rad}}. \quad (2.13)$$

2.3.2 Guadagno

La direttività è semplice da definire matematicamente ma non altrettanto sperimentalmente, in quanto per determinare la potenza irradiata sarebbe necessario misurare la densità di potenza su una superficie sferica molto grande. Per questo abbiamo bisogno di un'altra grandezza, il guadagno, che utilizza la potenza attiva entrante ai morsetti dell'antenna P_t (basta misurare tensione e corrente ai morsetti), detta anche potenza di alimentazione.

Il guadagno è così definito:

$$G = \frac{4\pi R^2 S_{max}}{P_t}. \quad (2.14)$$

Idealmente la potenza irradiata e la potenza di alimentazione dovrebbero essere uguali, ma parte della potenza viene dissipata sui conduttori sotto forma, ad esempio, di calore. Si definisce rendimento ξ di un'antenna il rapporto tra potenza irradiata e potenza di alimentazione

$$\xi = \frac{P_{rad}}{P_t}. \quad (2.15)$$

Guadagno e direttività sono quindi legati da:

$$G = \frac{4\pi R^2 S_{max}}{P_t} = \frac{P_{rad}}{P_t} \frac{4\pi R^2 S_{max}}{P_{rad}} = \xi D. \quad (2.16)$$

2.3.3 Area efficace

L'area efficace di un'antenna rappresenta la superficie ideale di raccolta di radiazione elettromagnetica incidente su di essa ed è una misura dell'area di assorbimento della densità di potenza che incide su un'antenna. Tale grandezza è definita come rapporto tra la potenza consegnata al carico (potenza ricevuta da esso) e la densità di potenza incidente sull'antenna. Si definisce dunque area efficace dell'antenna ricevente:

$$A_e = \frac{P_{rec}}{|\overline{E_i}|^2 / 2\eta}, \quad (2.17)$$

dove P_{rec} è la potenza ricevuta in condizioni di massimo, mentre E_i è il campo elettrico irradiato dall'antenna trasmittente, misurato nella posizione dell'antenna ricevente ma senza di essa, se il puntamento è ottimale il valore della densità di potenza dell'onda incidente e quello del massimo generato coincidono.

$$P_{rec} = A_e \frac{|\overline{E_i}|^2}{2\eta} = A_e S_{max} = A_e \frac{GP_t}{4\pi R^2}. \quad (2.18)$$

Si considera ora una coppia di antenne, una trasmittente (antenna 1) e l'altra ricevente (antenna 2), indichiamo con G_1 e G_2 il loro guadagno, la potenza ricevuta sull'antenna 2 è la seguente:

$$P_{rec} = A_{e2} \frac{G_1 P_t}{4\pi R^2}. \quad (2.19)$$

Invertendo il ruolo delle antenne, per il teorema di reciprocità risulta:

$$P_{rec} = A_{e1} \frac{G_2 P_t}{4\pi R^2}. \quad (2.20)$$

Quindi:

$$A_{e1} G_2 = A_{e2} G_1 \quad (2.21)$$

Le antenne sono del tutto arbitrarie, dunque:

$$\frac{A_{e1}}{G_1} = \frac{A_{e2}}{G_2} = \text{costante} \quad (2.22)$$

Il calcolo per il dipolo elementare porta ad avere questa equazione:

$$A_e = G \frac{\lambda^2}{4\pi}. \quad (2.23)$$

La massima potenza che un'antenna può ricevere è la seguente:

$$P_{rec} = P_t G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (2.24)$$

detta formula di Friis.

2.4 Diagrammi di radiazione

Un diagramma di radiazione è una rappresentazione grafica tridimensionale della densità di potenza irradiata emessa da un'antenna in funzione della direzione di emissione. Per comodità viene visualizzato su due diagrammi bidimensionali: il diagramma nel piano E misura la radiazione in funzione della direzione in un piano contenente un raggio vettore che va dal centro dell'antenna al punto di radiazione massima e l'intensità del vettore campo \bar{E} , il diagramma nel piano H è una rappresentazione grafica della radiazione di un'antenna in funzione della direzione nel piano contenente il raggio vettore nella direzione di massima radiazione e l'intensità del vettore campo magnetico. Il diagramma di radiazione fornisce informazioni sulla larghezza del fascio irradiato, sull'esistenza di lobi laterali, e sulla risoluzione dell'antenna. L'ampiezza del fascio di radiazione è l'ampiezza angolare del diagramma di radiazione dell'antenna considerata tra i punti in cui l'intensità è la metà del massimo; si misura in gradi. Altre larghezze che sono spesso di interesse sono: la larghezza a -10 dB e la larghezza a -20 dB, che rappresentano la larghezza angolare tra i punti in cui la potenza è rispettivamente un decimo e un centesimo del valore massimo.

I diagrammi di radiazione sono spesso classificati in base alla loro forma. Un diagramma isotropo è quello in cui la potenza per unità di angolo solido è uguale in tutte le direzioni. Sebbene non sia fattibile nella pratica, questo diagramma viene spesso utilizzato come riferimento. Un diagramma omnidirezionale è uno che ha eguale ampiezza in ogni direzione in un piano passante attraverso l'antenna. Un diagramma a pennello è uno che ha il lobo principale molto stretto e con sezione trasversale circolare. Un diagramma a ventaglio è uno che ha una sezione trasversale fortemente ellittica, producendo cioè un fascio che è stretto in una direzione e largo nell'altra.

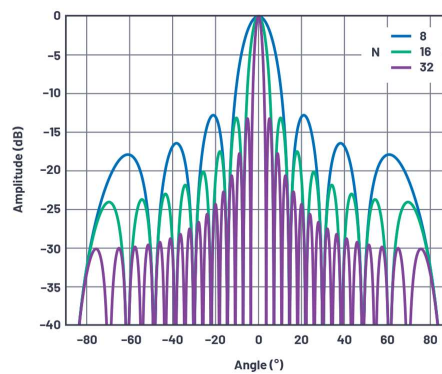


Figura 2.2: Grafico a "ventaglio"

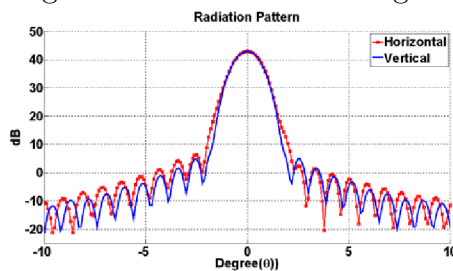


Figura 2.3: Grafico a "pennello"

Figura 2.4: Esempio tipi di diagrammi di radiazione

Viene spesso utilizzata la scala logaritmica per poter visualizzare al meglio i lobi minori (come nei diagrammi in 2.4).

2.5 Caratteristiche antenne per radioastronomia

I requisiti fondamentali di un'antenna utile per la ricerca radioastronomica sono: -
diagramma di radiazione molto direttivo e con ridotto livello dei lobi laterali;

- elevato potere risolutivo;

- grande area efficace necessaria per raccogliere maggiore densità di potenza dal
flusso di radiazione incidente;

- struttura orientabile in grado di puntare qualsiasi oggetto sulla volta celeste.

La direttività indica la particolare attitudine del sistema di captare energia elettromagnetica da una direzione privilegiata; in ogni altra direzione si ha un comportamento ricettivo tanto peggiore quanto maggiore è l'attenuazione dei lobi secondari. È così garantita un'efficace protezione non solo nei riguardi del rumore atmosferico, ma soprattutto rispetto alle interferenze.

Il raggiungimento di tali obiettivi comporta la realizzazione di antenne con apertura molto superiore alla lunghezza d'onda operativa. Per motivi meccanici non è semplice realizzare antenne così grandi; si ricorre dunque all'utilizzo di strutture composite, costituite da allineamenti o raggruppamenti di elementi singoli monodimensionali (array lineari, antenne Yagi) o bidimensionali: disponendo gli elementi secondo opportune geometrie e alimentandoli con i corretti rapporti di fase, è possibile modellare il diagramma di radiazione risultante in modo da soddisfare le specifiche di direttività, area efficace, il massimo livello consentito per i lobi laterali ed il potere risolutivo.

Alle lunghezze d'onda dell'ordine di un metro, si realizzano allineamenti di dipoli o antenne ad elica con riflettore comune o individuale: per ottenere un fascio a pannello (pencil beam: elevata direttività su entrambi i piani principali del diagramma di radiazione), i due allineamenti devono essere disposti ortogonalmente l'uno all'altro nelle direzioni nord-sud ed est-ovest (secondo la nota geometria della "croce di Mills").



Figura 2.5: FAST(Five hundred meter Aperture Spherical Telescope) il più grande riflettore parabolico mai costruito

Il potere risolutivo di un'antenna, ad una data frequenza, aumenta con la distanza massima fra due radiatori elementari della struttura, mentre la sensibilità cresce proporzionalmente alla superficie totale. Nelle ricerche radioastronomiche sono indispensabili antenne caratterizzate da diagrammi di radiazione con elevato potere risolutivo nei due piani principali ortogonali. Esempio comune è quello del riflettore parabolico a simmetria circolare in cui la massima distanza tra due elementi radianti è pari al diametro del paraboloide mentre la superficie di captazione equivalente (area efficace) è proporzionale al quadrato del diametro. Il costo di questa struttura è superiore al cubo del diametro ed è utile solo quando il diametro non supera i 75-100m; oltre queste dimensioni risulta una sensibilità inutilmente elevata. Lo stesso vale per la maggior parte delle antenne con diagrammi di radiazione a pennello. Differente situazione è quella delle cosiddette antenne di sintesi in cui il diagramma di radiazione è ottenuto combinando tra loro due o più diagrammi con minore direttività, come ad esempio quelli forniti da allineamenti di dipoli. Tale struttura esibisce un potere risolutivo proporzionale alla lunghezza (distanza massima tra

gli elementi); se la spaziatura tra gli elementi è costante, anche la superficie equivalente ed il costo sono proporzionali alla lunghezza. Il potere risolutivo è inoltre elevato solo in un piano ed il corrispondente diagramma di radiazione esibisce una forma a "ventaglio". È possibile ottenere un diagramma a pennello combinando i segnali captati da due allineamenti di dipoli posti tra loro perpendicolari in modo da sfruttare il potere risolutivo di entrambi svincolandosi dalla rigida dipendenza tra potere risolutivo, sensibilità e costo tipica delle altre antenne. Esempio notevole di struttura che realizza questi principi è la Croce di Mills, composta da due lunghe e strette cortine di dipoli orizzontali a polarizzazione concorde, allineate perpendicolarmente tra loro in modo da formare una croce a bracci uguali. Ciascun allineamento, mediante opportune regolazioni in ampiezza e fase degli accoppiamenti alla linea di trasmissione, presenta un diagramma di radiazione a ventaglio. I segnali corrispondenti ai due diagrammi sono moltiplicati elettronicamente utilizzando un blocco chiamato correlatore all'uscita del moltiplicatore; forniranno una tensione in media non nulla solo quelle componenti dei segnali presenti in entrambi i diagrammi di radiazione.

Si ottiene un diagramma risultante a pennello che è equivalente, come potere risolutivo, a quello caratteristico di un paraboloide circolare con diametro di poco inferiore alla lunghezza del braccio della croce, mentre la sensibilità equivale a quella che si otterrebbe con un solo braccio. Con il radiotelescopio a Croce di Mills è possibile ottenere un potere risolutivo decine di volte superiore a quello di un paraboloide a parità di costo. Questo vantaggio è ottenuto a spese di altri requisiti. Vi è una notevole complessità costruttiva nel sistema di illuminazione, nell'elettronica del ricevitore e nel sistema di puntamento elettrico (variante di fase), che deve sostituire almeno in parte l'organo di puntamento meccanico del riflettore paraboloide. Pertanto, mentre un ricevitore a basso rumore e altamente stabile può essere collegato all'illuminatore paraboloide, per il radiotelescopio "Croce di Mills" è necessario progettare un sistema di ricezione adeguato con un'architettura molto

complessa. Per frequenze più elevate, fino alle microonde, oltre ad utilizzare strutture singole di antenne a superficie come i paraboloidi (il più grande dei quali, mobile su entrambi gli assi, è quello di 100 metri di diametro ad Effelsberg, vicino Bonn, in Germania) si realizzano array di notevoli dimensioni (come il VLA: Very Large Array di Socorro negli Stati Uniti) con paraboloidi, antenne ad elica e cortine di dipoli con riflettore. È chiaro che la costruzione di strutture mobili in grado di puntare e in alcuni casi inseguire qualsiasi corpo celeste sulla sfera celeste è spesso accompagnata da problemi costruttivi e di costo. Per questo motivo, sono stati costruiti strumenti semifissi o fissi (radiotelescopi di transito) che sfruttano la rotazione della Terra per il puntamento delle sorgenti radio o la scansione elettronica dell'alimentazione di fase di un singolo elemento di un array (phased array - sezione 3.5) per ottenere spostamenti entro poche decine di gradi dal lobo principale.

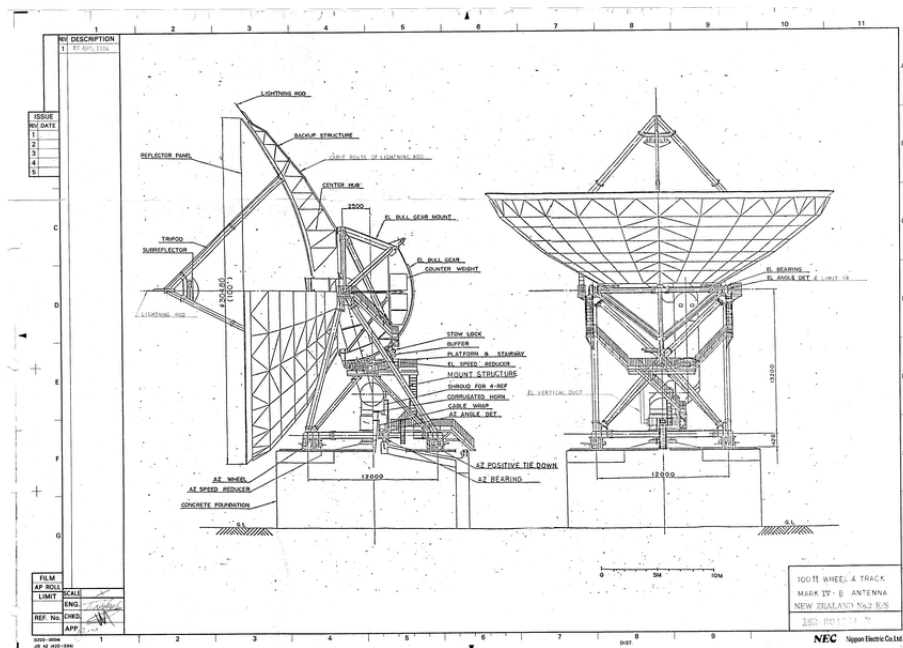


Figura 2.6: Progetto originale Sardinia radio telescope

2.5.1 Riflettori parabolici

Il riflettore parabolico è una delle strutture più utilizzate in Radioastronomia, utilizzato sia come antenna singola (Sardinia radio telescope, SAR) sia come strutture composite (Very large array, VLA). La sua qualità più interessante deriva dalla sua forma parabolica, che permette di focalizzare l'energia proveniente da una sorgente lontana in un singolo punto. Questa caratteristica è fondamentale, in quanto se il dispositivo di captazione (illuminatore) risulta ben collocato, tutta l'energia elettromagnetica incidente catturata dal riflettore potrà essere utilmente utilizzata per estrarre segnale utile.



Figura 2.7: Un ottimo esempio di riflettore parabolico è il Sardinia radio telescope (SAR)

Possiamo considerare, in prima approssimazione, i riflettori parabolici come aperture piane circolari illuminate da radiazione elettromagnetica, con assegnata distribuzione di ampiezza e di fase; la distanza del primo zero dal lobo principale (misura potere risolutivo) è pari a $1.22\lambda/D$.

In realtà la distribuzione non è uniforme, ma esiste un certo "tapering" di ampiezza. Una formula approssimata utilizzata per determinare l'ampiezza del fascio a metà

potenza, tenendo conto dell'illuminazione non uniforme dell'apertura è la seguente:

$$\Delta = HPBW \approx \frac{(60 \div 70)\lambda}{D} \quad [gradi]. \quad (2.25)$$

Il rapporto tra diametro (D) e lunghezza focale (distanza fuoco antenna e illuminatore, indicato con la lettera a) si chiama apertura relativa e determina l'ampiezza angolare necessaria per il fascio dell'illuminatore. Di solito si utilizzano aperture relative dell'ordine di $0.3 \leq D/a \leq 0.6$; il fuoco si trova esternamente alla bocca e l'angolo del fascio dell'illuminatore si riduce a valori ottenibili con antenne moderatamente direttive. Poiché il paraboloide è conveniente, rispetto ad altre antenne, solo se il suo diametro è pari a $D = (8 \div 10)\lambda$, l'intervallo pratico di lunghezze d'onda d'impiego è pari a $D/10 \leq \lambda \leq 10E$, dove E è l'errore medio della superficie di lavorazione del riflettore. Il guadagno ottenibile con un'antenna a riflettore parabolico è dato da:

$$G = \eta_i \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2, \quad (2.26)$$

dove η_i è detto "efficienza superficiale", vale approssimativamente $0,45 \div 0,55$ e tiene conto di alcuni fattori che riducono, non in maniera trascurabile, il massimo guadagno teorico ottenibile.

Essendo la superficie del riflettore in materiale metallico non è difficile avere un'alta riflettività (essendo il cammino di penetrazione dell'onda elettromagnetica piccolo rispetto alle necessita meccaniche di stabilità richieste dalla struttura). Il problema pratico è quello di mantenere il corretto profilo (parabolico) su un'ampia area: la superficie riflettente sulle grandi antenne è di solito realizzata di tanti pannelli più piccoli separati e montati su un supporto strutturale che definisce la forma del riflettore. Si hanno deformazioni causate dalle forze gravitazionali, dal vento o da espansioni termiche differenziali; gli effetti più dannosi sono le deformazioni gravitazionali sopportate dalla struttura di sostegno. Per utilizzare con vantaggio una superficie metallica riflettente in un'antenna radioastronomica, questa non deve significativamente allontanarsi dalla forma e dal profilo di curva ideale (in questo

caso quello parabolico) sotto qualsiasi condizione operativa. Ogni deviazione della superficie dalla forma geometrica ideale produce inevitabili errori di fase nella distribuzione di campo sull'apertura. Dal punto di vista costruttivo la forma desiderata per il riflettore può essere raggiunta solo al prezzo di un limite finito di tolleranza che causa un errore di fase δ pari a $\delta \pm 4\pi\epsilon/\lambda$ [rad] dove $\pm\epsilon$ la tolleranza costruttiva della superficie, cioè l'errore medio dello scostamento della superficie del riflettore dal contorno ideale nella direzione di propagazione dell'onda. La massima tolleranza ammessa, perché la risposta dell'antenna si mantenga accettabilmente vicina a quella teorica di diffrazione, comporta un errore di fase non superiore a $\lambda \approx 0.6$; gli errori sulla superficie del riflettore devono quindi mantenersi inferiori a $\epsilon \leq \lambda/20$ [m]. In questo caso l'efficienza della superficie η_{sup} descritta dalla formula di Ruze 2.27 è del 67%

$$\eta_{sup} = e^{-(4\pi\epsilon/\lambda)^2}. \quad (2.27)$$

Occorre ricordare che gli effetti della forza gravitazionale dovuta al considerevole peso della struttura e all'azione del vento (grande superficie d'impatto offerta dal riflettore in particolari condizioni di orientamento) possono causare importanti deformazioni meccaniche della superficie del riflettore. È possibile dimostrare che gli errori sulla superficie riflettente dovuti alle deformazioni strutturali causate dalla forza gravitazionale, dai vari momenti flettenti e dal vento agente sulla struttura, aumentano all'aumentare del diametro D dell'antenna secondo le relazioni:

$$\begin{cases} \epsilon_g \propto D^3 & \text{deformazioni dovute alla forza gravitazionale,} \\ \epsilon_m \propto D^4 & \text{deformazioni dovute ai momenti flettenti,} \\ \epsilon_v \propto D^2 & \text{deformazioni dovute all'azione del vento.} \end{cases} \quad (2.28)$$

Questi errori vanno confrontati con la lunghezza d'onda. Si osserva che, essendo il potere risolutivo della struttura proporzionale a

$$(\text{potere risolutivo})_{min} \approx \frac{\lambda_{min}}{D} \approx \frac{20\epsilon}{D} \propto D, \quad (2.29)$$

non è di alcuna utilità aumentare il diametro del paraboloide se non si correggono prima gli errori introdotti dalle deformazioni strutturali; si ottiene, al contrario, un

peggioramento delle prestazioni.

Un'altra causa di errore è dovuta alla dilatazione termica dei pannelli che compongono il paraboloide. Si dimostra come la dipendenza funzionale degli errori introdotti dalla dilatazione d un elemento metallico lineare di lunghezza a riposo l_0 sia del tipo $\varepsilon_t \approx 0.6 l_0 \sqrt{\alpha \Delta T}$ [m] dove $l = l_0(1 + \alpha \Delta T)$ è la legge di dilatazione lineare dell'elemento metallico caratterizzato dal coefficiente di dilatazione lineare α e sottoposto al gradiente di temperatura ΔT .

2.6 Interferometria

La risoluzione angolare, o capacità di un radiotelescopio di distinguere i dettagli degli oggetti che osserva, diminuisce con la lunghezza d'onda di osservazione e aumenta con la dimensione dello strumento. I radiotelescopi, che operano a lunghezze d'onda molto (anche un milione di volte) superiori a quelle dei telescopi ottici, devono essere conseguentemente assai più grandi per ottenere la stessa risoluzione angolare dei telescopi ottici. Tuttavia, anche la più grande antenna parabolica esistente (il radiotelescopio cinese di 500 metri FAST), non può ottenere una risoluzione angolare migliore di circa un minuto d'arco, (la risoluzione angolare a cui è sensibile l'occhio umano), mentre i telescopi ottici riescono a vedere tipicamente dettagli cento volte più piccoli. Il problema della scarsa risoluzione angolare è risolto in radioastronomia utilizzando il principio dell'interferometro per sintetizzare una grande apertura, attraverso l'utilizzo di antenne più piccole (più semplici da realizzare meccanicamente). Nell'interferometro la risoluzione angolare non è data infatti dalla dimensione della singola antenna parabolica, come in un radiotelescopio a singola apertura, bensì dalla massima distanza tra le antenne che costituiscono il radiointerferometro. Nel caso più semplice di un radiointerferometro a due antenne, il segnale da una radiosorgente puntiforme arriva ai due elementi con un certo

ritardo di fase dovuto alla differenza di cammino dell'onda proveniente dalla radio-sorgente. Rimettendo in fase i segnali delle due antenne, mediante l'utilizzo di un correlatore, si producono frange di interferenza simili a quelle di un interferometro ottico. Una rete di antenne mobili combinata con la rotazione terrestre permette di ottenere un numero elevato di coppie di elementi a diversa distanza tra loro, così da sintetizzare l'effetto di un radiotelescopio molto grande (sintesi di apertura terrestre). I segnali vengono inviati lungo cavi elettrici dalle diverse antenne a un calcolatore centrale (correlatore), che li combina in un unico segnale in uscita. Quanto maggiore è la distanza tra le antenne dell'interferometro, tanto migliore sarà la risoluzione angolare ottenuta.

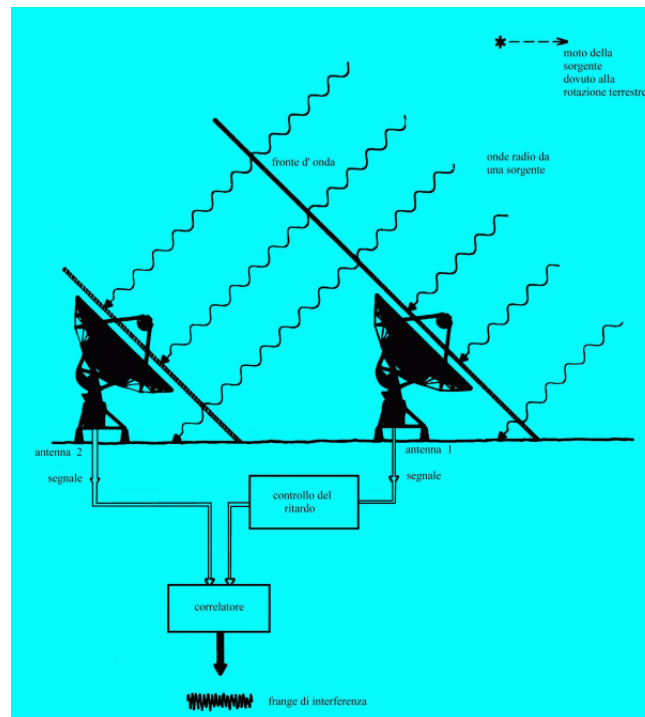


Figura 2.8: Diagramma descrittivo di un radiointerferometro semplice a due antenne

Capitolo 3

Panoramica impianti più importanti

3.1 Very Large Array - VLA

Il Very large array (VLA) è situato nella Piana di San Augustine nel deserto di Socorro (New Mexico, USA), è uno dei più grandi radio osservatori del mondo. La sua particolarità è che le antenne possono essere spostate dalla loro sede mediante delle rotaie, si dice quindi che è un array di antenne riconfigurabile. È composto da 28 antenne (27 attive e 1 di backup) disposte a forma di Y come si può vedere in fig 3.2, ciascun braccio lungo circa 36 chilometri. Un ramo della struttura è spostato di 5° rispetto alla direzione nord-sud, mentre gli altri bracci sono posti a 120° l'uno dall'altro. Le antenne invece, non sono equispaziate ma si ha una variazione della distanza tra esse che segue la legge:

$$d_n = n^\alpha \quad \alpha \approx 1.72. \quad (3.1)$$

Ciascuna antenna ha un diametro di 25 metri e ha un peso di circa 230 tonnellate ed è in grado di puntare ed inseguire qualsiasi oggetto sulla volta celeste con un

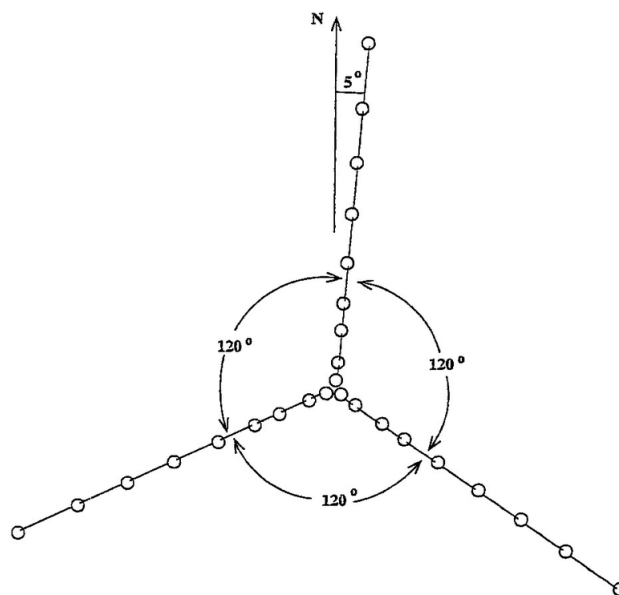


Figura 3.1: Schema disposizione antenne VLA

angolo minimo di 8 gradi sopra l'orizzonte; l'intera struttura può essere elettronicamente accoppiata per fornire la risoluzione equivalente di un'antenna singola dal diametro di 36 chilometri ed una sensibilità equivalente a quella di un singolo disco del diametro di 130 metri.

L'array può essere disposto in quattro configurazioni differenti chiamate A, B, C, D: nella prima la lunghezza di ciascun asse può essere portata fino a 36 chilometri, (lunghezza massima asse) nella seconda fino a 10 chilometri, poi rispettivamente fino a 3,6 e 1 chilometro. La risoluzione che può essere raggiunta nella configurazione A, al massimo della frequenza di lavoro (43 GHz) è pari a 0.04 secondi d'arco; in ogni caso la risoluzione dipende dalla configurazione adottata e dalla frequenza operativa. Il sistema è in grado di pianificare osservazioni radioastronomiche in un intervallo di frequenze che va da 300 MHz fino a 50 GHz. Lo strumento opera moltiplicando i dati provenienti da ciascuna coppia di antenne e li combina in modo opportuno per formare diversi diagrammi di interferenza. Il VLA viene utilizzato dagli astronomi di tutto il mondo per studi sulle caratteristiche dell'atmosfera (fenomeni di

assorbimento molecolare), per inseguimenti di satelliti, studi di geodinamica della crosta terrestre e molte altre applicazioni scientifiche. Una delle ultime modifiche effettuate all'impianto è l'aggiunta di una fibra ottica per connettere l'impianto alla rete VLBA in Pie Town nel Nuovo Messico: in questo modo è possibile usare gli impianti in tempo reale espandendo considerevolmente le possibilità osservative dei sistemi originali. La rete VLBA consiste in 10 radiotelescopi distribuiti negli USA, Hawaii e St. Croix nei Caraibi.



Figura 3.2: Vista dall'alto struttura VLA

3.2 Square Kilometer Array (SKA)

Lo Square Kilometer Array (SKA), è un progetto internazionale a cui hanno aderito 16 nazioni, tra cui l'Italia, il progetto punta ad ampliare i confini della radioastronomia costruendo due radiotelescopi leader a livello mondiale. L'INAF è stato attivamente coinvolto nello sviluppo tecnico della più grande infrastruttura di radioastronomia del mondo, attraverso specifici programmi europei, fin dall'inizio del progetto. Nel corso degli anni, ha partecipato attivamente al lavoro dei quattro consorzi di progettazione SKA recentemente conclusi, il cui obiettivo generale era

quello di sviluppare e progettare tutti gli elementi dell'antenna.

In particolare, l'INAF ha partecipato alle seguenti attività:

-design delle antenne, dei ricevitori e della catena di acquisizione del segnale per le antenne a bassa frequenza di SKA-Low (in Australia Occidentale), in collaborazione con le Università di Bologna, Firenze e Ferrara e l'Istituto di elettronica e d'ingegneria dell'informazione e delle telecomunicazioni (IEIIT) del CNR;

-nello sviluppo di software di monitoraggio e controllo del telescopio e delle antenne a parabola SKA-Mid (in Sudafrica);

-nello sviluppo di algoritmi e processing di dati;

-in un programma per lo sviluppo di ricevitori di tipo Phased Array Feed (PAF).

Lo SKA avrà un'apertura totale di un chilometro quadrato, opererà su un ampio spettro di frequenze e le sue dimensioni lo renderanno 50 volte più sensibile di un qualsiasi altro radiotelescopio. L'impianto è diviso in due continenti e ciascuno dei due ha frequenze operative differenti, i quali prendono il nome di SKA-Low e SKA-Mid. SKA-Mid è una raccolta di 197 antenne paraboliche tradizionali, è costruita nella regione del Karoo in Sud Africa, mentre le 131.072 antenne più piccole a forma di albero di Natale di SKA-Low sono costruite nell'Australia occidentale, sulla terra tradizionale dei Wajarri Yamaji. Le antenne sono distribuite su grandi distanze, con le più lontane costruite a 150 km di distanza l'una dall'altra in Sud Africa e a 74 km l'una dall'altra in Australia.

3.2.1 SKA-Low

SKA-Low è composto da 131.072 antenne log-periodiche (antenne la cui lunghezza degli elementi, dipoli, varia secondo il logaritmo della frequenza) poste in 512 stazioni differenti (256 antenne per stazione), distribuite su una superficie di 419.000 m^2 , la frequenza operativa è di 50÷350 MHz.

SKALA 4.1AL è il nome del prototipo di antenne installate attualmente in Australia Occidentale. Essa è un'antenna, somigliante a un albero di Natale, log-periodica

e a doppia polarizzazione che assicura un'ampia banda di ricezione. Il team italiano ha anche lavorato allo sviluppo di un amplificatore a basso rumore (LNA) installato nella parte superiore dell'antenna per ottenere l'amplificazione dei deboli segnali astronomici. I prototipi SKALA 4.1AL sono ora in fase di collaudo all'Aperture Array Verification System 2.0 (AAVS2), la stazione di 256 antenne (completata nel 2019 da ingegneri e tecnici dell'INAF) presso il Murchison Radio astronomy Observatory, con il supporto dei colleghi australiani. SKA-Low è un telescopio "matematico" che funziona filtrando i disturbi indesiderati dal cielo osservabile. Le sue antenne captano segnali dall'intero cielo e, attraverso l'elaborazione dei dati, gli astronomi possono "puntare" in diverse direzioni, anche se le antenne non hanno parti in movimento. Sono costituite da rami orizzontali di diversa lunghezza, detti dipoli. Dall'alto verso il basso, le coppie di dipoli diventano sempre più grandi; ciascuno assorbe le onde radio provenienti dal cielo e quanto più grande è il dipolo, tanto maggiore è la lunghezza d'onda che assorbe. Quando le onde radio eccitano i dipoli, viene generata una corrente elettrica raccolta tramite una linea di trasmissione centrale e trasmessa alla sommità dell'antenna, dove alcuni amplificatori a basso rumore amplificano il segnale debole senza aggiungere interferenze indesiderate. Il segnale viene quindi inviato dall'antenna a uno smartbox in ciascuna stazione, dove i segnali elettrici vengono convertiti in segnali ottici così da poter essere trasmessi su fibra ottica a una velocità di 7,2 TB/s all'impianto di elaborazione centrale (CPF) in loco. Le stazioni più distanti lungo i bracci a spirale del telescopio dispongono di strutture di elaborazione remota, ciascuna delle quali gestisce i segnali provenienti da sei stazioni, prima di inviarli al CPF; è qui che si realizza veramente il telescopio matematico. Quando i segnali arrivano nel CPF, affrontano una complicata tecnologia di elaborazione che li vede puliti e digitalizzati, vengono quindi inviati a un centro di elaborazione fuori sede situato a Perth, dove il correlatore e il beamformer combinano segnali provenienti da varie stazioni per "puntare" digitalmente il telescopio in una o più direzioni nel cielo.

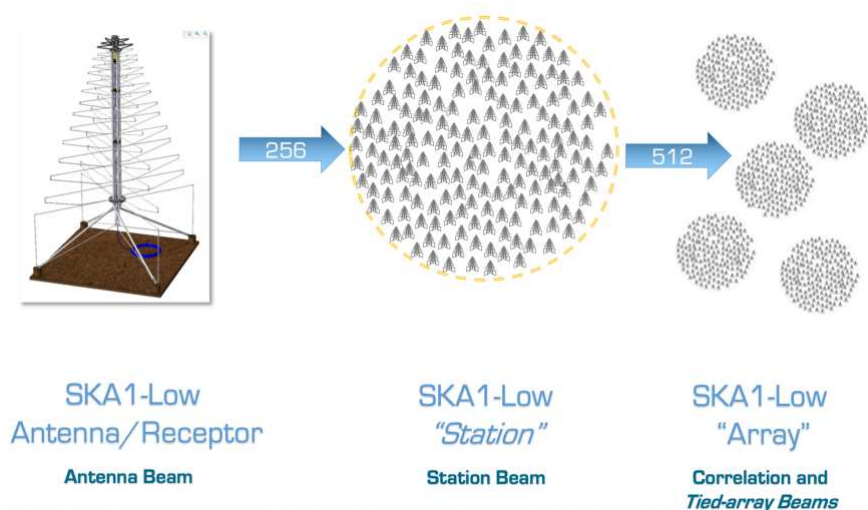


Figura 3.3: Rappresentazione suddivisione impianto

3.2.2 SKA-Mid

SKA-Mid è composto da 197 parabole completamente orientabili, incluso il radiotelescopio MeerKAT già esistente, l'area raccolta è di $33000 m^2$ mentre la massima distanza tra le parabole è di 150km, la frequenza operativa è più alta rispetto a SKA-Low ed è di $350 \text{ MHz} \div 15.4 \text{ GHz}$ ma punta ad arrivare fino a 24 GHz. Il radiotelescopio MeerKAT esistente entrerà a far parte dell'array SKA-Mid, con le parabole MeerKAT da 13,5 m di diametro che si uniranno alle parabole SKA da 15 m leggermente più grandi e saranno tutte integrate in un unico sistema. Da un nucleo centrale largo circa un chilometro, le antenne si irradieranno in tre bracci a spirale a grande distanza; le due antenne più lontane di SKA-Mid saranno distanti 150 km. Rispetto al radiotelescopio Very Large Array (VLA) degli Stati Uniti, attualmente il miglior strumento simile al mondo, SKA-Mid avrà quattro volte la risoluzione, cinque volte la sensibilità e riuscirà a campionare il cielo fino a 60 volte più velocemente.

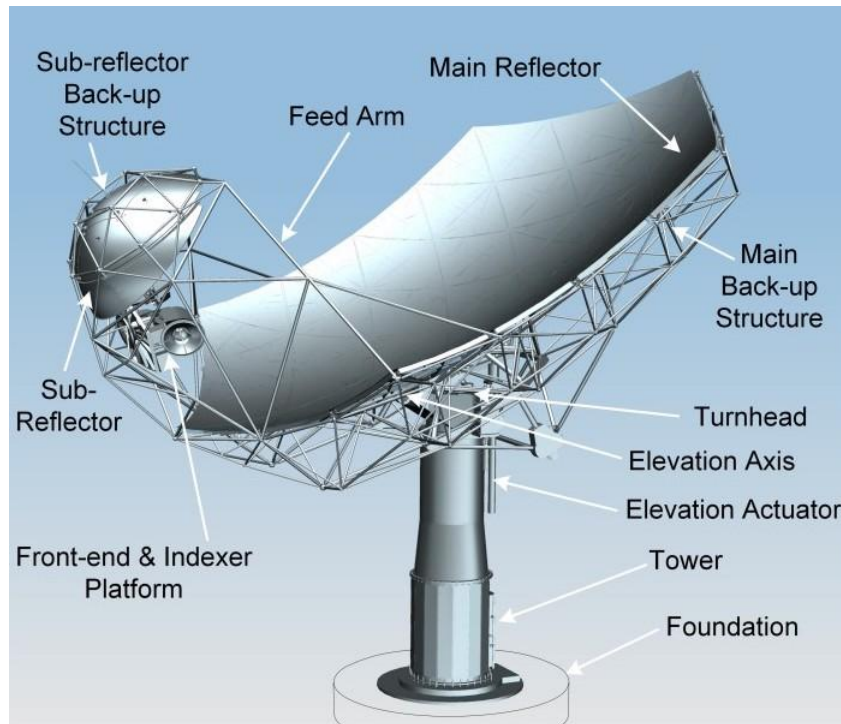


Figura 3.4: Descrizione antenna SKA-Mid

3.3 Osservatorio astronomico di Medicina

Fu installato nel 1960 nei pressi di Medicina (vicino Bologna), per iniziativa dell'università di Bologna, un radiotelescopio costituito da un'antenna a riflettore cilindrico-parabolica lunga 100 metri e larga 6, funzionante alla frequenza di 327 MHz ($\lambda=90\text{cm}$). Si trattava di uno strumento di prova che doveva servire come base al progetto della Croce del Nord che, inaugurata nel 1964 è stato uno dei radiotelescopi più precisi e sensibili al mondo.

Ora sono presenti due radiotelescopi molto diversi tra loro:

- un'antenna parabolica che fa parte del sistema VLBI con diametro di 32metri (Radiotelescopio G. Grueff)
- l'interferometro "Croce del Nord", composto da dipoli semplici e non completamente direzionabile.



Figura 3.5: Vista dall'alto struttura

La Croce del Nord è costruita per ricevere le onde radio centrate alla frequenza di 408 MHz, corrispondente ad una lunghezza d'onda di 73.5 cm, con una banda di circa 2.5 MHz. Si tratta di uno strumento di transito, regolabile solo in declinazione, che osserva quindi soltanto gli oggetti celesti che culminano sul meridiano celeste del luogo. L'impianto è costituito da due serie di antenne: una posta in direzione Est-Ovest (E-W), l'altra in direzione Nord-Sud (N-S). Il braccio E-W è costituito da una unica antenna con uno specchio di forma cilindrico-parabolica lungo 564 m e largo 35 m. Lungo l'asse focale, parallelo all'asse di rotazione, e a distanza di circa 20 metri da esso, si trovano allineati 1536 dipoli (equidistanti di 36 cm) che trasformano le onde radio incidenti in tensioni elettriche misurabili. Il braccio N-S è costituito da 64 antenne (anche queste di forma cilindrico-parabolica) lunghe 23,5 m e larghe 8 m, disposte parallelamente a 10 m l'una dall'altra. Sull'asse focale di ogni antenna, analogamente al braccio E-W, sono disposti 64 dipoli. Dalle caratteristiche geometriche del sistema d'antenna si può determinare il potere risolutivo dello strumento: si ricava che è pari a $4^{\circ}5'$ in direzione N-S e $4'$ in direzione E-W.

Date le notevoli dimensioni del sistema d'antenna, notevole risulta l'energia elettromagnetica raccolta, risulta quindi possibile rilevare e individuare radiosorgenti molto deboli.



Figura 3.6: Foto storica braccio E-W

I dipoli del braccio E-W sono divisi in 6 sezioni di 256 dipoli ciascuna e, all'interno di ciascuna sezione, si opera una somma progressiva di tutti i segnali raccolti, passando da 256 segnali elementari ad un unico segnale, mantenendo le specifiche richieste di impedenza del sistema di ingresso del ricevitore. Le 64 antenne che costituiscono il braccio N-S sono divise in 8 sezioni che raggruppano ciascuna 8 antenne. All'interno di ogni antenna si trovano 64 dipoli e, anche in questo caso la topologia è la stessa, ma meno rigorosa, scegliendo un compromesso fra una buona efficienza ed una struttura relativamente semplice da un punto di vista costruttivo; i segnali provenienti dai dipoli sono successivamente sommati fino a ottenere un singolo segnale per ogni antenna. Sei segnali provenienti dalle sei sezioni del braccio E-W vengono sommati in fase, si ottiene dunque il fascio B: se i segnali elettrici che arrivano alle sei sezioni del braccio E-W sono gradualmente ritardati, quando vengono sommati è come se si combinassero i segnali provenienti da punti in fase su una superficie d'onda che è spostata rispetto alla direzione del meridiano:

se lo spostamento è in anticipo si ottiene il cosiddetto fascio A. Ritardando ancora progressivamente, ma in senso opposto, si ottiene un segnale che proviene da una direzione spostata rispetto al meridiano in ritardo: si tratta del fascio C. In questo modo, con un semplice "gioco" di natura elettrica, si ottengono 3 fasci d'antenna puntati, rispettivamente, leggermente in anticipo rispetto alla direzione del meridiano, sul meridiano e leggermente in ritardo rispetto a tale direzione. Dato che lo strumento è di transito, esso riceve le radiazioni elettromagnetiche solo quando la radiosorgente, per effetto della rotazione terrestre, si trova nella direzione di puntamento (ascensione retta ed angolo orario) del radiotelescopio: la radiosorgente sarà allora rivelata prima sul fascio A, poi sul fascio B ed infine sul fascio C, mentre un eventuale disturbo generato in prossimità del radiotelescopio (quindi di origine terrestre) interesserà contemporaneamente i 3 fasci. È quindi possibile prevedere 3 misure per ogni radiosorgente e disporre di un primo criterio per discriminare fra i segnali prodotti da radiosorgenti e quelli originati da disturbi locali. Allo stesso modo, i segnali che arrivano dalle otto sezioni N-S possono essere manipolati ottenendo cinque fasci diretti elettricamente in cinque direzioni diverse, spostati gradualmente da nord a sud. In questo caso, è possibile sondare simultaneamente un'area più ampia di cielo durante la stessa registrazione.

3.3.1 Radiotelescopio G. Grueff

L'antenna parabolica è stata costruita nel 1983 su progetto dell'azienda americana TIW per partecipare alle osservazioni VLBI (Very Long Baseline Interferometry). L'antenna parabolica è costituita da uno specchio primario di 32 m di diametro, regolabile in tutte le direzioni. Questa antenna parabolica è in grado di seguire qualsiasi sorgente radio all'orizzonte compensando il movimento apparente causato dalla rotazione della Terra. A seconda del funzionamento, può essere utilizzata avvalendosi anche di un secondo specchio di forma iperbolica, detto specchio secondario o subriflettore, del diametro di 3.2m (sistema ottico di tipo Cassegrain).

Quando lo specchio secondario è in funzione, le onde elettromagnetiche vengono convogliate sul fuoco secondario, dove risiede il sistema di ricezione; in certi casi è invece sufficiente un sistema ottico meno complesso: il subriflettore viene spostato e come sistema di ricezione viene utilizzato quello posto sul fuoco primario. L'antenna, che lavora sia come elemento della rete VLBI che, come strumento single-dish, attualmente dispone di ricevitori in varie bande tra 1.4 GHz e 26 GHz. Per poter aumentare la frequenza massima di lavoro e portarla a 90 GHz, lo specchio primario sarà completamente sostituito nel 2024: la superficie diventerà di tipo attivo, grazie a nuovi pannelli di alluminio e attuatori elettromeccanici in grado di regolare micrometricamente la posizione. Questo aggiornamento è indispensabile per riuscire a compensare le deformazioni gravitazionali e termiche, garantendo che il radiotelescopio lavori alla massima efficienza in qualsiasi direzione di puntamento. Da maggio 2023 la parabola ha un nome proprio: si chiama "Radiotelescopio G. Grueff" in memoria dell'astrofisico Gavril Grueff, che ne ha curato la progettazione e la nascita.



Figura 3.7: Vecchio correlatore a nastro magnetico del sistema VLBI di Medicina

Bibliografia

- [1] Flavio falcinelli. *Tecniche radioastronomiche*. A cura di Sandit s.r.l. first edition. 2013. URL: <https://www.libreriauniversitaria.it/tecniche-radioastronomiche-falcinelli-flavio-sandit/libro/9788889150634>.
- [2] *Radiotelescopi Medicina*. URL: <http://www.inaf.it/it>.
- [3] *Skao official website*. URL: <https://www.skao.int/en>.
- [4] Gary A. Thiele Warren L. Stutzman. *Antenna Theory and Design*. A cura di Wiley. third edition. 2013. URL: <https://www.libreriauniversitaria.it/antenna-theory-and-design-stutzman/book/9780470576649>.