RadioAstroLab s.r.l.
60019 Senigallia (AN) - Italy
T +39 071 6608166
F +39 071 6612768
www.radioastrolab.it

Esperimenti a 11.2 GHz con SPIDER230: Il transito di Cassiopea A

Flavio Falcinelli

Doc. Vers. 1.0 del 27.03.2014
@ 2014 RadioAstroLab

RadioAstroLab s.r.l., Via Corvi, 96 – 60019 Senigallia (AN)
Tel. +39 071 6608166 Fax: +39 071 6612768
Web: www.radioastrolab.it Email: info@radioastrolab.it

Copyright: diritti riservati. Il contenuto di questo documento è proprietà del costruttore. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo senza il permesso scritto di *RadioAstroLab s.r.l.*.

RadioAstroLab s.r.l.
60019 Senigallia (AN) - Italy
T +39 071 6608166
F +39 071 6612768
www.radioastrolab.it

Proseguiamo la descrizione degli esperimenti realizzabili con il radiotelescopio *SPIDER230* illustrando la registrazione del transito di *Cassiopea A*, resto di supernova tra gli oggetti più interessanti per la radioastronomia, la radiosorgente extrasolare più brillante del cielo nella banda delle microonde.

Nel visibile *Cassiopea A* è molto debole, dato che la sua radiazione è assorbita dalla polvere interstellare nel piano della via lattea. Questa radiosorgente è stata identificata nel 1947 (tra le prime registrate da un radiotelescopio) e la sua controparte ottica è stata scoperta nel 1950. Si pensa che la supernova che ha originato *Cassiopea A* sia esplosa 11000 anni fa e che la luce dell'esplosione abbia raggiunto la Terra circa 300 anni fa. Non si hanno notizie di un avvistamento di questa supernova, ma è possibile che la stella di sesta magnitudine *3 Cassiopeiae*, catalogata da John Flamsteed il 16 agosto 1680, fosse proprio *Cassiopea A*.

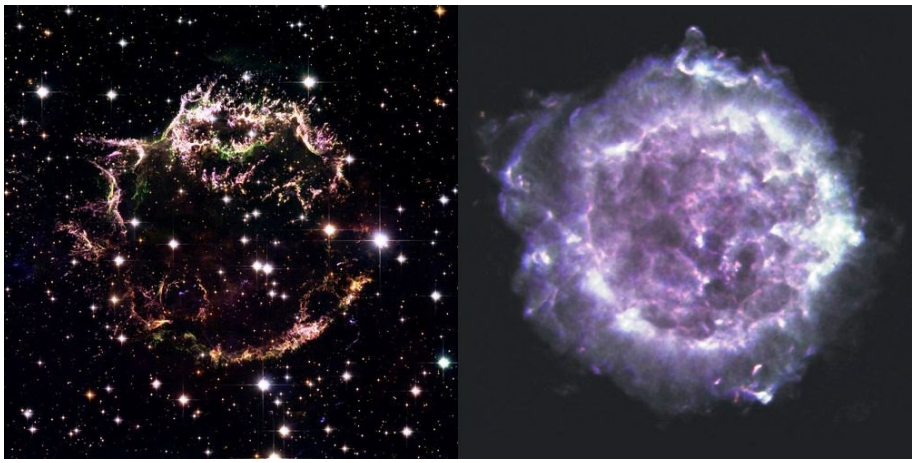


Fig. 1: Suggestive immagini di *Cassiopea A* nella banda del visibile (a sinistra) e nella banda radio (a destra). L'immagine nel visibile è stata ripresa dal telescopio spaziale Hubble (NASA, ESA and the Hubble Heritage STScI/AURA-ESA/Hubble Collaboration. Acknowledgement: Robert A. Fesen - Dartmouth College, USA and James Long – ESA/Hubble), mentre l'immagine radio è stata ripresa dal radiotelescopio VLA (Image courtesy of NRAO/AUI).

Cassiopea A è una delle "radiosorgenti campione" spesso utilizzata dai radioastronomi per calibrare gli strumenti e determinare il diagramma di ricezione dell'antenna (Fig. 3). Infatti la procedura prevede la registrazione del transito di una radiosorgente con diametro apparente molto piccolo rispetto all'ampiezza del lobo principale dell'antenna. Questo oggetto è ideale per verificare le prestazioni di *SPIDER230* e ricavare l'ampiezza del lobo di ricezione del nostro strumento: oltre ad essere la sorgente campione più brillante, è caratterizzata da un andamento rettilineo dello spettro (in scala bi-logaritmica) su quasi tutta la banda radio (Fig. 3), con una diminuzione secolare nella densità di flusso dell'ordine dell'1.1%/anno. Per ottenere il valore della densità di flusso di *CasA* nella banda da 20 MHz a 30 GHz si utilizza l'espressione:

$$S(f)=A\cdot f^{n} \quad [\frac{W}{Hz\cdot m^{2}}]$$

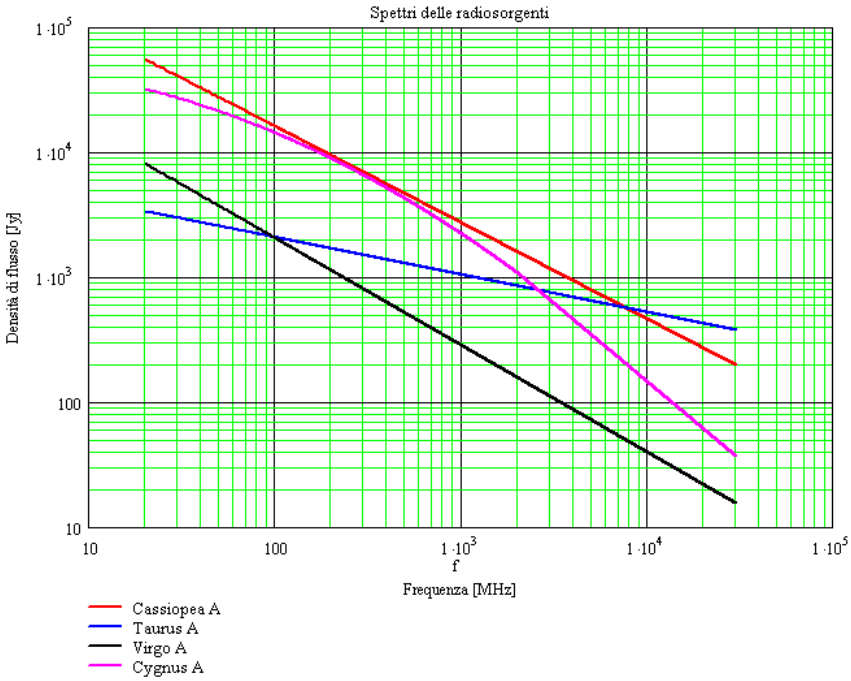
dove il valore della costante *A* si ricava tenendo conto che *S(1 GHz)=2723 Jy* con indice spettrale *n=-0.77* (epoca 1986). La seguente figura mostra i calcoli che sono stati eseguiti per ricavare lo spettro di

Cassiopea A e la corrispondente intensità di emissione alla frequenza di 11.2 GHz, che vale circa 423 Jy (si è considerata la variazione secolare del flusso).

Densità di flusso di CASSIOPEA A [Jy] quando la frequenza è espressa in [MHz]:

$Epoch := 1986$	$Anno := 2014$	Anno attuale dell'osservazione.
$Sc(f) := 10^{5.745-0.77\cdot\log(f)}$	[Jy]	Flusso di CASSIOPEA A all'epoca 1986.
$d(f) := 0.97 - 0.30\cdot\log(f\cdot 10^3)$	[% per anno]	Decremento secolare del flusso di CASSIOPEA A.
		$d(11200) = -1.1$ [% per anno a 11.2 GHz]
$Scas(f) := Sc(f) + \frac{(Anno - Epoch)\cdot d(f)}{100}$	[Jy]	Flusso di CASSIOPEA A all'epoca attuale.

Fig. 2: Calcolo dello spettro di Cassiopea A (andamento del flusso in funzione della frequenza) nella banda radio da 20 MHz a 30 GHz (fonte dei dati: *"The Absolute Spectrum di Cas A: An Accurate Flux Density Scale and a Set of Secondary Calibrators", J. W. M. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, A. Witzel – Astron. Astrophys. 61,99-106 (1977)*).



$Scas(11200) = 423.4$	[Jy]	Densità di flusso di CASSIOPEA A a 11.2 GHz.
$Stau(11200) = 506.2$	[Jy]	Densità di flusso di TAURUS A a 11.2 GHz.
$Svir(11200) = 36$	[Jy]	Densità di flusso di VIRGO A a 11.2 GHz.
$Scyg(11200) = 126.9$	[Jy]	Densità di flusso di CYGNUS A a 11.2 GHz.

Fig. 3: Spettro radio delle più intense "radiosorgenti campione" utilizzate dai radioastronomi per calibrare i loro strumenti. Le piccole dimensioni angolari di questi oggetti (generalmente non superiori a 4 minuti d'arco) e il flusso relativamente intenso li rendono molto utili come sorgenti di prova per verificare le prestazioni dei radiotelescopi e delle antenne.

RadioAstroLab s.r.l.
60019 Senigallia (AN) - Italy
T +39 071 6608166
F +39 071 6612768
www.radioastrolab.it

Utilizzando questi dati abbiamo simulato il transito di *CasA* registrato con il radiotelescopio *SPIDER230* (Fig. 4). Le stime sono teoriche e considerano un comportamento ideale del sistema ricevente. La temperatura di brillanza della radiosorgente, dell'ordine di 210 K, produce un incremento nella temperatura di antenna pari a circa 0.68 K, molto "diluito" a causa della differenza fra le sue dimensioni apparenti e l'ampiezza del lobo di ricezione del radiotelescopio.

I calcoli mostrano che la variazione di potenza "vista" all'ingesso del ricevitore *RAL10PL* è dell'ordine di 0.1 dBm con un valore di -52.7 dBm corrispondente al punto di massima intensità durante il transito. La registrazione simulata riporta anche la deriva della linea di base radiometrica per agevolare il confronto con i dati sperimentali mostrati in Fig. 8.

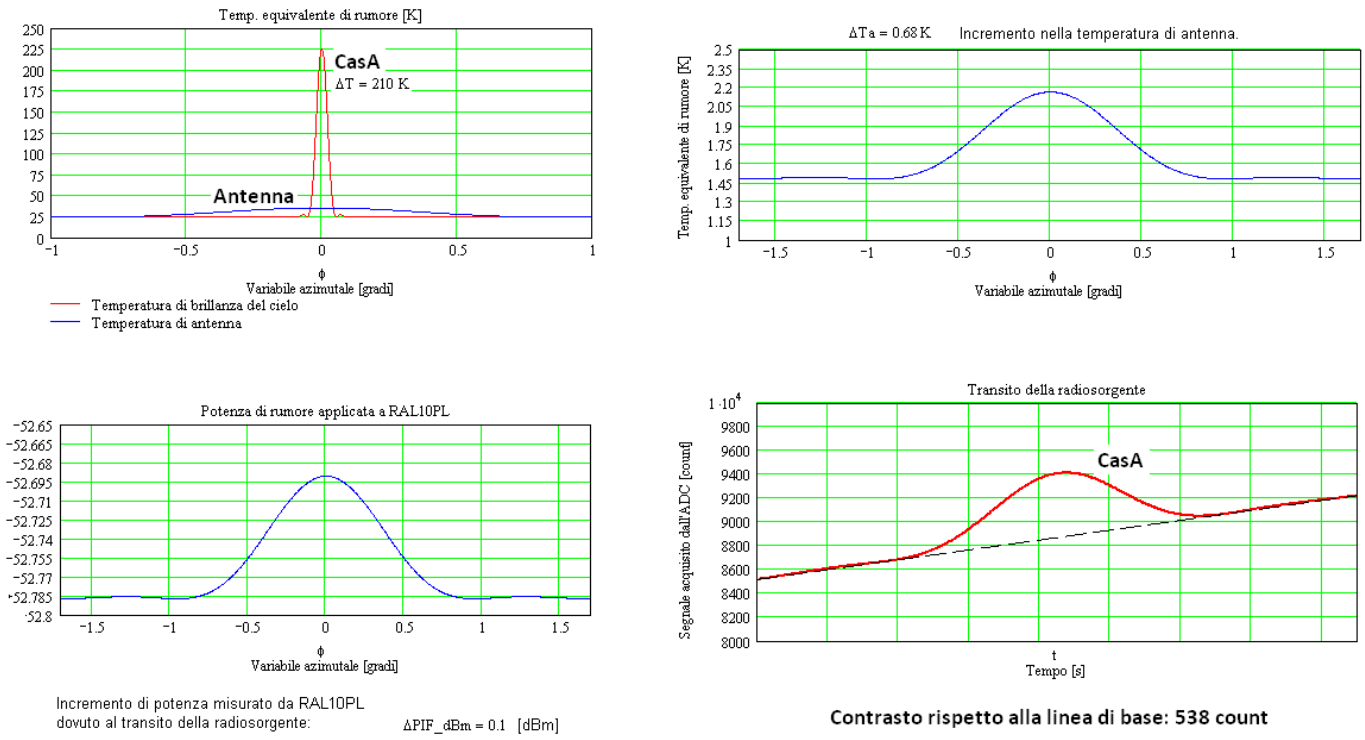


Fig. 4: Registrazione simulata del transito della radiosorgente *Cassiopea A (3C461)* davanti all'antenna del radiotelescopio *SPIDER230*.

La verifica delle valutazioni teoriche è stata effettuata dal Dr. Filippo Bradaschia, CEO di *PrimaLuce Lab*, azienda partner di *RadioAstroLab* nella realizzazione del radiotelescopio *SPIDER230* che ringraziamo per la collaborazione. La stazione ricevente, installata presso il Polo Tecnologico di Pordenone (Fig. 5) comprende il ricevitore *11,2 GHz Total-Power RAL10PL* realizzato da *RadioAstroLab* per *SPIDER230* e il sistema di antenna (riflettore parabolico circolare di 2.3 metri di diametro) con montatura equatoriale, motorizzazione e cupola di protezione realizzati da *PrimaLuce Lab*. Lo strumento è completamente controllabile, attraverso una linea Ethernet, dal software *RadioUniverse.*

Approfittando di una giornata di "cielo asciutto" sono state organizzate le osservazioni per registrare il transito di *Cassiopea A*. Grazie all'utilizzo di una montatura equatoriale, l'orientamento dell'antenna del radiotelescopio *SPIDER230* è molto preciso ma, essendo piccola la dimensione apparente della radiosorgente, trovare l'oggetto può essere difficoltoso. Per facilitare questo compito si è sfruttata

un'interessante caratteristica di *SPIDER230*: la possibilità di riprendere radio-immagini di una specifica zona di cielo utilizzando il database del software *RadioUniverse*.

Orientando l'antenna del radiotelescopio verso la regione di cielo dove è presente *Cassiopea A* si sono registrate due immagini consecutive a bassa risoluzione, con dimensioni pari a 10 x 10 pixel radio e risoluzione 0.5°, in modo da inquadrare un'area di cielo ampia 5 x 5° entro la quale si poteva essere ragionevolmente certi di trovare la radiosorgente. Il fattore di amplificazione del ricevitore *RAL10PL* è stato impostato sul valore massimo.

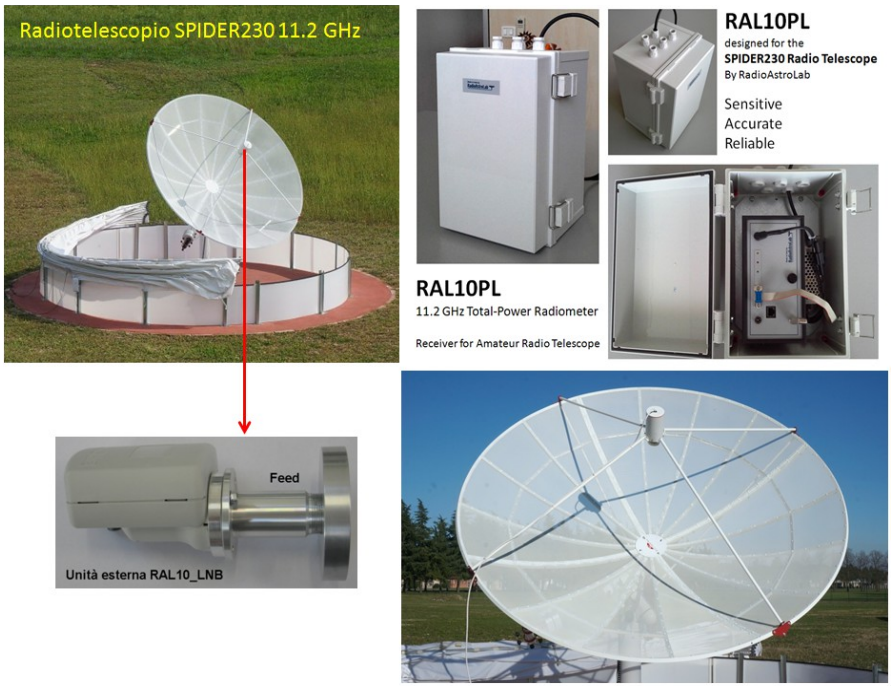


Fig. 5: Il radiotelescopio *SPIDER230* utilizzato per la registrazione del transito di *Cassiopea A*.

Le due immagini ottenute (Fig. 6) evidenziano il gradiente di segnale causato dal contrasto esistente tra il fondo del cielo (pixel di colore blu) e il flusso emesso dal suolo e dall'atmosfera vicini all'orizzonte (pixel di colore rosso). L'angolo in basso a destra rappresenta il punto più vicino all'orizzonte. La presenza di *CasA* sembra essere confermata dal debole incremento di luminosità del pixel indicato nella Fig. 6 rispetto al contorno.

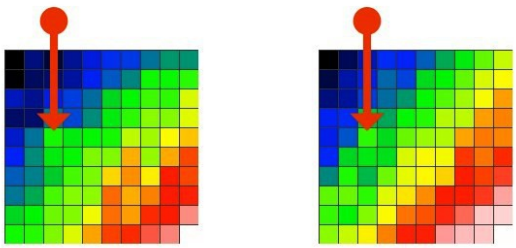


Fig. 6: Immagini radio consecutive registrate da *SPIDER230* dell'area di cielo di *Cassiopea A*.

RadioAstroLab s.r.l.
60019 Senigallia (AN) - Italy
T +39 071 6608166
F +39 071 6612768
www.radioastrolab.it

Queste misure sono servite a centrare la regione nella mappa radio dove si ipotizzava la presenza della radiosorgente, così da richiedere al software *RadioUniverse* la registrazione automatica di 5 transiti consecutivi di *CasA*, ampi 8 gradi. In tutte le registrazioni si è osservato un picco di segnale, con sufficiente contrasto, esattamente nel punto occupato dalla radiosorgente. Si sono quindi esportati i dati per le successive elaborazioni con un foglio di calcolo.

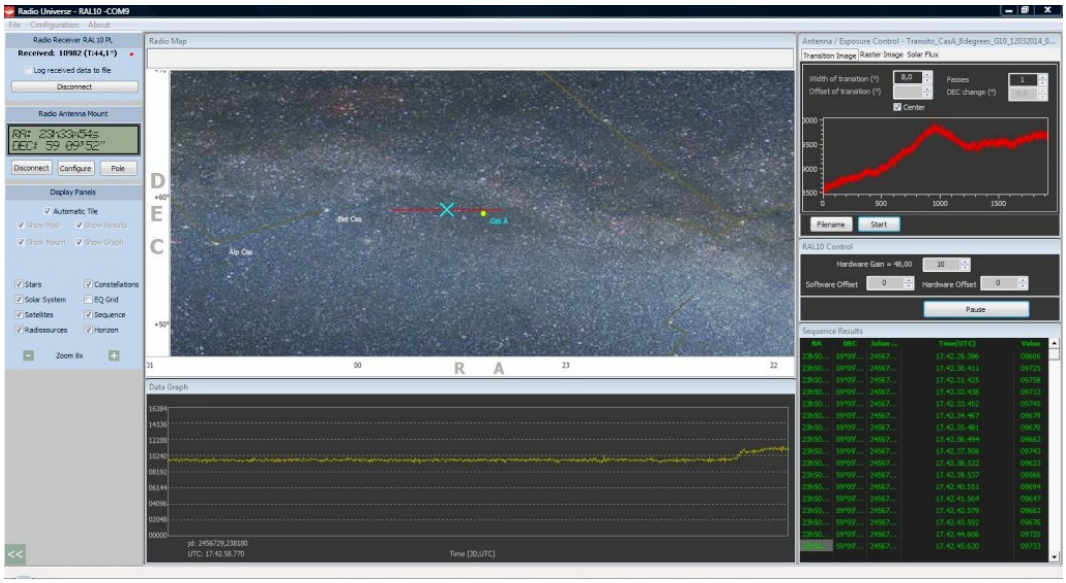


Fig. 7: Verifica dei transiti di *Cassiopea A* con il software *RadioUniverse*.

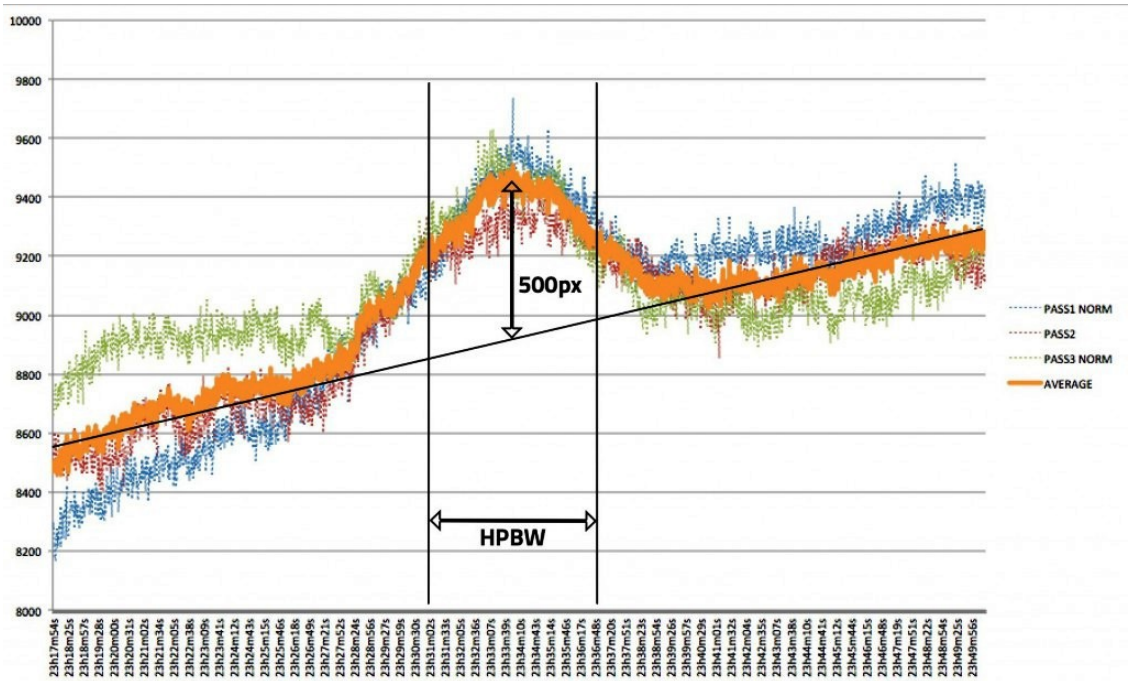


Fig. 8: Transiti della radiosorgente *Cassiopea A*.

Analisi dell'antenna a riflettore parabolico con simmetria circolare:

Si ipotizza un'antenna con diametro pari a: $D := 2.3 \cdot m$ e un'efficienza $\eta := 0.73$

si avrà un guadagno dell'ordine di:

$$Ga_max := \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda o}\right)^2 \qquad Ga_max = 53121.68$$

$$Ga_max_dB := 10 \cdot \log(Ga_max) \qquad Ga_max_dB = 47.25 \quad [dB]$$

Gain pattern dell'antenna (modello relativo a un riflettore parabolico con simmetria circolare) che utilizza l'approssimazione dell'apertura piana circolare con illuminazione uniforme:

$$Ga(\phi) := Ga_max \cdot if\left[\phi = 0, 1, \left(\frac{2 \cdot J1\left(\frac{\pi \cdot Deff \cdot \sin\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\lambda o}\right)}{\frac{\pi \cdot Deff \cdot \sin\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\lambda o}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\phi \cdot \frac{\pi}{180}}\right)^2\right]$$

$Deff := \sqrt{\eta} \cdot D$

E' definito un diametro efficace dell'antenna che tiene conto della sua efficienza [η].

$$Ga_dB(\phi) := 10 \log(Ga(\phi))$$

Calcolo dell'ampiezza del fascio a metà potenza: si trova il valore angolare corrispondente a un'ampiezza del gain pattern di antenna pari a metà potenza. Tale valore, raddoppiato, sarà il parametro HPBW.

$x := 0.1$

valore angolare di partenza

Given

$$\frac{Ga_max}{2} = Ga_max \cdot if\left[x < 0, 0, \left(\frac{2 \cdot J1\left(\frac{\pi \cdot Deff \cdot \sin\left(x \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\lambda o}\right)}{\frac{\pi \cdot Deff \cdot \sin\left(x \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\lambda o}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin\left(x \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{x \cdot \frac{\pi}{180}}\right)^2\right]$$

$HPBW_g := 2\,Find(x)$

Valore angolare del beam di antenna

$HPBW_g = 0.8$ [gradi]

Angolo solido del fascio d'antenna:

$$\Omega a_g := \pi \cdot \left(\frac{HPBW_g}{2}\right)^2 \quad [gradi^*gradi] \qquad \Omega a_g = 0.51$$

$$\Omega a := \left(\frac{4\pi}{41253}\right) \cdot \Omega a_g \quad [ster] \qquad \Omega a = 0$$

$$lobo_ant(\phi) := if\left(|\phi| > \frac{HPBW_g}{2}, 0, Ga_max_dB - 3\right)$$ Limite dell'ampiezza angolare del fascio di antenna.

$\phi := -180, -180 + 0.01 .. 180$ Angolo di azimut [gradi].

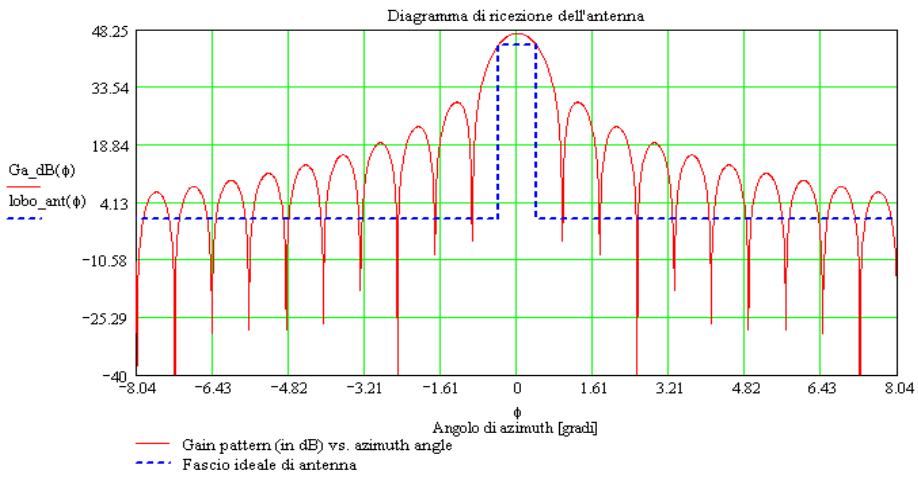


Fig. 9: Modello semplificato del diagramma di ricezione dell'antenna di *SPIDER230* (riflettore parabolico con simmetria circolare e diametro di 2.3 metri): è stata approssimata come un'apertura circolare uniformemente illuminata e si è riportata solo la variazione azimutale.

Come precedentemente sottolineato, *Cassiopea A* (oggetto "quasi puntiforme") è spesso utilizzata come radiosorgente campione per verificare le caratteristiche del diagramma di ricezione del radiotelescopio, caratterizzato da un lobo di ricezione molto più ampio. In particolare interessa ricavare il parametro *HPBW (Half Power Beam Width)* che rappresenta l'ampiezza a metà potenza del lobo principale dell'antenna (espresso in gradi). Si utilizza la seguente formula:

$$HPBW = 0.25 \cdot t \cdot \cos(\delta)$$

dove t è il tempo di transito della radiosorgente espresso in minuti e δ è la sua declinazione in gradi. Analizzando le registrazioni di Fig. 8 (traccia arancione che rappresenta la media calcolata su 5 transiti consecutivi) si vede come il tempo impiegato da *Cassiopea A* per attraversare i due punti a metà potenza (indicati dalle righe verticali) sia pari a circa 6 minuti. Considerando che la sua declinazione è $\delta=59°$, il calcolo fornisce:

$$HPBW = 0.25 \cdot 6 \cdot \cos(59) = 0.77°$$

in accordo con il valore $HPBW=0.8°$ ottenuto dal modello dell'antenna di *SPIDER230* utilizzato nelle simulazioni (Fig. 9).

@ 2014 RadioAstroLab

RadioAstroLab s.r.l., Via Corvi, 96 – 60019 Senigallia (AN)
Tel. +39 071 6608166 Fax: +39 071 6612768
Web: www.radioastrolab.it Email: info@radioastrolab.it

Copyright: diritti riservati. Il contenuto di questo documento è proprietà del costruttore. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo senza il permesso scritto di *RadioAstroLab s.r.l.*.