

Appunti per la preparazione al laboratorio di interferometria

Versione 5.0 - 26 Ottobre 2016

Descrizione dell'esperimento

A . RUMORE

1) *Acquisizione "total power" (ad antenna singola)*

Si punta l'interferometro sul Sole e si effettua una acquisizione con il sistema OTF (On-The-Fly). Una osservazione OTF consiste nel muovere l'interferometro in Azimuth con una certa velocità mentre si acquisiscono i dati: l'interferometro transita sul Sole.

2) *Valutazione e calcolo del rumore*

Si stampa il segnale ricevuto dall'osservazione della regione di cielo scelta e si stima, dal grafico e/o dalla tabella dei dati, il rumore ("Noise", N) in Volt. Per fare questo bisogna trovare l'intensità massima e minima sul grafico. Una valutazione approssimata ma attendibile del rumore associato a una intensità di segnale si ottiene con la seguente formula:

$$N \sim [(\text{Intensità massima}) - (\text{Intensità minima})] / 6$$

3) *Valutazione qualitativa dell'intensità della sorgente e del rapporto Segnale/Rumore*

Si stampa il tracciato del Sole e si fa una stima, attraverso il grafico, del valore del picco di intensità del segnale S in Volt e del rapporto segnale-rumore S/N (Signal-to-Noise).

Il rapporto Segnale/Rumore (Signal-to-Noise) è approssimabile con la seguente formula:

$$S / N \sim (\text{Picco del Segnale}) / \text{Rumore}$$

Il segnale S può essere stimato come l'intensità massima misurata al di sopra del livello medio del fondo cielo:

$$S = (\text{Picco massimo}) - (\text{fondo cielo})$$

B . SENSIBILITÀ

1) Misura della densità di flusso ricevuta dalla sorgente, in unità di Jansky

L'energia ricevuta per unità di tempo, di area e di frequenza da una sorgente è chiamata densità di flusso e ha come unità di misura il Jansky (Jy): $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$

Il Sole, alla frequenza di osservazione dell'interferometro (1296 MHz, corrispondente alla lunghezza d'onda $\lambda = 23 \text{ cm}$), attualmente ha una densità di flusso di circa $7.5 \times 10^5 \text{ Jy}$.

Per confronto, un trasmettitore da 100 Watt, con la stessa larghezza di banda ($\Delta\nu = 5 \text{ MHz}$) dell'interferometro didattico, posto sulla Luna produrrebbe un segnale di circa 10^3 Jy di densità di flusso.

Usando l'osservazione della singola antenna e il valore noto del flusso del Sole, a partire dal massimo del segnale si calcola il valore del fattore di conversione da Volt a Jansky.

2) Rumore espresso in Jansky

In un nuovo grafico si riporta l'intensità in Jy del segnale ricevuto dal Sole (che può essere comodamente ricavato dal grafico in Volt usando il fattore di conversione volt/Jy appena calcolato) verso il tempo (in sec). Sul nuovo grafico si valuta infine il rumore in Jansky.

Considerando alcune tra le radiosorgenti più conosciute e brillanti del cielo (elencate alla fine di questo documento) gli studenti possono valutare qualitativamente dove si collocherebbero queste radiosorgenti, in termini di flusso emesso rispetto a quello del Sole, sul grafico della presente osservazione.

C . CORRELAZIONE

1) Osservazione interferometrica

Si visualizzano tutte le tracce ottenute dall'osservazione OTF con l'interferometro didattico: sia il segnale della singola antenna che quello ottenuto dall'interferometro nelle due modalità *somma* e *prodotto*.

Si esegue **una nuova osservazione OTF** del Sole e si fa una valutazione qualitativa della differenza tra segnale total power e correlazione *somma* e *prodotto* dei segnali delle due antenne.

(Gli studenti riporteranno le loro conclusioni in una lista da discutere con il ricercatore).

2) Potere risolutore e distanza tra le antenne

Per un interferometro, le frange di interferenza sono tanto più ravvicinate quanto più le antenne che lo compongono sono lontane. A frange più strette corrisponde un miglior potere risolutore (capacità di osservare dettagli fini).

Si stampa il grafico della correlazione *prodotto*. Dati: il valore della lunghezza d'onda di osservazione ($\lambda=23 \text{ cm}$), la velocità angolare di scansione v all'elevazione E_l dell'osservazione, e l'intervallo temporale tra due picchi del segnale Δt , si calcola il potere risolutore ($\Delta\theta$) e la distanza (D) tra due antenne dell'interferometro con le formule seguenti.

La distanza D tra due antenne di un interferometro può essere stimata dalla

formula del potere risolutore:

$$\Delta\theta \approx \lambda / D \text{ radianti} \quad ; \quad 1 \text{ radiante} = 180^\circ / \pi$$

Il potere risolutore è pari all'angolo sotteso in cielo da due frange di interferenza, ed è quindi esprimibile anche come:

$$\Delta\theta = v \cdot \Delta t \text{ gradi}$$

Dove v è la velocità di scansione, in gradi/sec, con cui l'interferometro si muove per osservare una sorgente celeste che ha una certa elevazione, e Δt è l'intervallo temporale, in secondi, tra due picchi del segnale. Δt è quindi ricavabile dal grafico delle frange di interferenza.

La velocità di scansione in gradi/sec può essere ottenuta dalla tabella sottostante in funzione dell'elevazione della sorgente celeste al momento dell'osservazione.

TABELLA 1: Velocità di scansione dell'interferometro, in funzione dell'elevazione della sorgente celeste.

Elevazione (gradi)	Velocità (gradi/sec)
0.0	0.58
5.0	0.58
10.0	0.57
15.0	0.56
20.0	0.55
25.0	0.53
30.0	0.50
35.0	0.48
40.0	0.44
45.0	0.41
50.0	0.37
55.0	0.33
60.0	0.29
65.0	0.25
70.0	0.20
75.0	0.15
80.0	0.10
85.0	0.05

CARATTERISTICHE DELL'INTERFEROMETRO DIDATTICO

Frequenza centrale: 1296 MHz (lunghezza d'onda: 23 cm)

Banda passante della I.F.: 5 MHz

Beam di antenna: 16 gradi

$T_{\text{sys}} \sim 300 \text{ K}$

Guadagno: $\sim 20 \text{ dB}$

Le antenne sono poste a distanza di circa 4 metri. La lunghezza fisica delle due antenne Yagi e' di circa 3 metri. Ogni antenna è costituita da 35 dipoli elementari in successione, da quello più lungo che si chiama RIFLETTORE (R in Fig. 1, lungo $\lambda/2 + 5\%$) subito seguito dal DIPOLO centrale (DP in Fig. 1, quello da cui si preleva il segnale via cavo coassiale) che e' lungo $\lambda/2$ (11.5 cm) e spesso ripiegato su se stesso per ragioni di adattamento di impedenza a cui seguono i dipoli successivi sempre più corti fino al 35esimo (lungo $\lambda/2 - 5\%$) chiamati semplicemente DIRETTORI (D* in Fig. 1).

Ogni dipolo direttore se della giusta lunghezza, posto alla giusta distanza dai vicini, costituisce un generatore che re-irradia verso il DIPOLO centrale il segnale ricevuto. Se le fasi e quindi i singoli percorsi sono quelli corretti, tale DIPOLO riceverà la somma di tutti i singoli contributi. La posizione e la lunghezza del dipolo RIFLETTORE sono invece progettati per realizzare una condizione di somma in controfase sul DIPOLO centrale o somma per cui l'antenna NON può ricevere radiazione proveniente dal retro. Ovviamente più grande il numero dei dipoli maggiore risulterà il GUADAGNO in dB dell'antenna e quindi più stretto il suo BEAM.

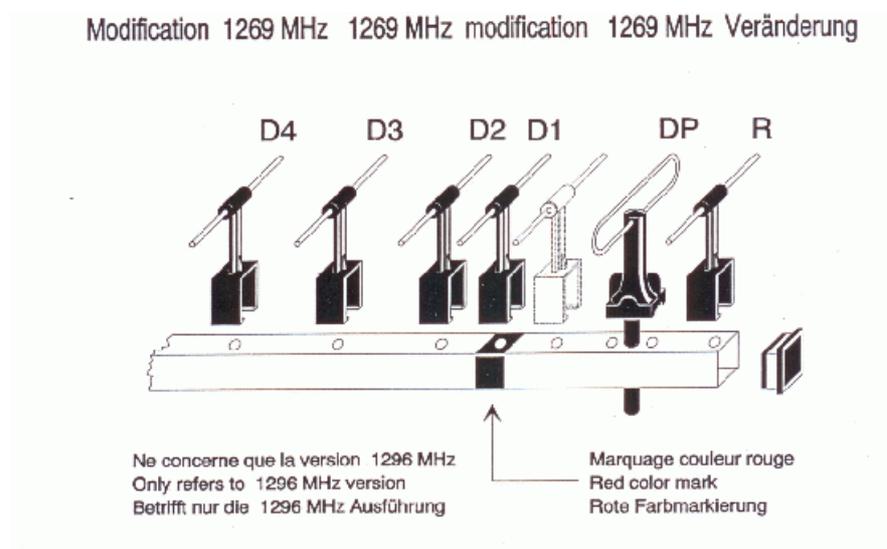


FIGURA 1

Durante l'osservazione, il "bastone" che supporta tutti i dipoli è orientato in modo da puntare la sorgente. In questo modo il RIFLETTORE sta dalla parte verso terra e può schermare tutta la *ground radiation*. La frequenza di lavoro corrisponde a una delle bande dedicate alle trasmissioni dei radioamatori (quindi, materiale di costruzione è commerciale, facilmente reperibile).

NOZIONI SUI RICEVITORI

- **Feed:** ha il compito di 1) illuminare il ricevitore con una distribuzione di fasi e ampiezze il più uniforme possibile); 2) non deve ricevere radiazioni non riflesse dallo specchio, come lo spillover dal suolo o le RFI, o segnale da radiosorgenti forti vicine alla posizione di puntamento. Il feed più semplice è un dipolo. Per osservazioni a $\lambda < 20\text{cm}$ il feed è generalmente nel fuoco secondario. Infatti il beam del feed deve avere un'apertura tale da illuminare completamente e senza spillover il secondario che per $\lambda < 20\text{ cm}$ dovrebbe avere una dimensione considerevole, bloccando quindi parte del segnale in arrivo. Per $\lambda > 20\text{ cm}$ solitamente si colloca il feed nel primario, in quanto le dimensioni del secondario non sono tali da bloccare parte del segnale ricevuto.
- **Ricevitore:** diviso logicamente e tecnicamente in due sezioni dal mixer: front-end (varia con la frequenza di osservazione) e back end indipendente dalla frequenza di osservazione, lavora alla "media frequenza")

Antenna - preamplifier - mixer+LO - IF - band pass - IF - SQ detector - integrator

Il segnale elettromagnetico che incide sull'antenna si trasforma in una debole tensione ($\ll 1$ millivolt) rapidamente variabile (freq. MHz - GHz), il cui valor medio nel tempo è nullo anche per tempi di integrazione brevissimi. Pertanto, oltre che amplificare il segnale bisogna anche rivelarlo.

Di solito è anche conveniente lavorare a una frequenza più bassa di quella del segnale che si vuole amplificare e rivelare: media frequenza (intermediate frequency, IF), ottenuta con il **Mixer**. Questo consente di non dover variare tutta la parte di back end al cambiare della freq. di osservazione, e limita le perdite per "effetto pelle" (dipendenti dalla radice quadrata della freq.) lungo i cavi che trasportano il segnale dal ricevitore al luogo dell'elaborazione. In genere la IF è compresa fra 10 e 60 MHz, ed è il segnale trasportato da questa che verrà poi amplificato e rivelato (NB: un'altra preamplificazione è già stata fatta appena rivelato il segnale).

Nel mixer il segnale viene sommato a un altro molto più forte (es 1 volt) fornito da un **Oscillatore Locale** LO che ha una frequenza non molto diversa da quella del segnale che si vuole rivelare, freq(s). Si ha che la $\text{freq(IF)} = \text{freq(LO)} - \text{freq(s)}$.

Si può notare che i parametri essenziali del segnale non vengono alterati dal mixer (il segnale in uscita consta di molte componenti a diverse frequenze ben precise, con ampiezze ben precise), e il segnale in uscita può essere amplificato e rivelato senza modificarne il contenuto di informazione. Usando i filtri appropriati, si scartano i segnali alle frequenze non utili conservando solo quello che porta l'informazione originale.

Dopo il mixer, l'**amplificatore** serve ad aumentare il segnale a livelli tali da attivare gli strumenti atti a registrarlo sotto forma analogica o digitale.

L'amplificatore non distingue tra segnale e rumore, quindi è meglio collocarlo il più vicino possibile all'ingresso del segnale astronomico nel sistema, per minimizzare l'amplificazione del rumore indotto dall'elettronica. L'amplificazione della potenza richiesta perché i ricevitori possano rivelare il segnale è dell'ordine di 80-100 dB (cioè $10^8 - 10^{10}$ volte); per questo si usano catene di amplificatori a cascata.

Le radiosorgenti più brillanti del cielo

IL SOLE

Dimensione angolare: $d = 0.5$ gradi

Area del Sole: $\pi \times d^2 / 4 = 3.14 \times (0.5)^2 / 4 = 0.2$ gradi quadrati

Flusso a 1415 MHz: $\sim 7.5 \times 10^{-21} \text{ W} / \text{m}^2 \text{ Hz} \sim 7.5 \times 10^5 \text{ Jy}$ (media misurata nel febbraio 2011). Il Sole attivo può emettere un flusso 4 ordini di grandezza superiore a quello del Sole quieto.

(vedere misure a www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/radio/45days_rad.txt)

Raggio equatoriale 695.000 km

Distanza Terra-Sole: 149 500 000 km (perielio 147 098 074 km,
afelio 152 097 701 km)

Massa: $1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$

Densità media 1410 kg/m^3 (> della densità dell'acqua, 1000 kg/m^3)

Temperatura media superficiale: 5.800 K

Temperatura media di una macchia solare: 3.800 K

Temperatura della corona solare: 2.000.000 K

Temperatura del nucleo: 15.000.000 K

Periodo di rotazione: 25 giorni (equatore), 36 giorni (poli)

Luminosità: $3,827 \times 10^{33} \text{ erg/sec}$ (386.000 miliardi di miliardi di kW)

Magnitudine assoluta: + 4,83

Magnitudine apparente: - 26,8

Composizione chimica: idrogeno 73%, elio 25%, metalli 2%. I metalli più abbondanti sono nell'ordine: ossigeno, carbonio, azoto, neon, ferro, silicio, magnesio, zolfo...

TAURUS A

Taurus A e' una radiosorgente molto brillante nella costellazione del Toro identificata con la Crab Nebula, resto di Supernova esplosa nel 1054 d.C..

Al centro della Crab Nebula esiste anche una pulsar, che ha un periodo di circa 33 millisecondi. In ottico è brillante.

Coordinate J2000: RA 05:34:32 Dec +22:00:52

Flusso(1296 MHz) = 930 Jy

Distanza: 6300 anni luce

Velocità di espansione: $\sim 1500 \text{ Km/sec}$

CASSIOPEIA A

E' la radiosorgente più brillante del cielo (a parte il Sole) ed è associata a un resto di supernova. In ottico è estremamente debole.

Coordinate J2000: RA 23:23:27 Dec +58:48:42

Il suo flusso diminuisce leggermente ogni anno:

Flusso(1296 MHz) nel 1980 = 2229.9 Jy

Flusso(1296 MHz) nel 2008 = 1634.9 Jy

Distanza: ~ 11000 anni luce

Velocità di espansione: 4000 - 6000 Km/sec

CYGNUS A

Radiosorgente extragalattica, si trova in un ammasso di galassie povere, di cui è l'oggetto più brillante. Otticamente presenta due nuclei.

Coordinate J2000: RA 19:59:28 +40:44:02

Flusso(1296 MHz) = 1598 Jy

Dimensioni angolari: ~ 0.55' x 0.45'

Distanza: ~ 600 milioni di anni luce (redshift $z=0.0561$).

SAGITTARIUS A

Sorgente radio complessa al centro della Via Lattea. Fortemente oscurata dalla polvere. E' formata da tre componenti: un resto di supernova (Sgr A Est), una struttura spiraliforme (Sgr A Ovest) e una sorgente radio brillante e compatta al centro della spirale della struttura ovest, chiamata Sgr A*.

Sgr A Est ha caratteristiche tali da far pensare che sia ciò che resta di una stella esplosa circa 5000 anni fa.

Sgr A Ovest, detta anche "Minispirale" è formata da emissione di gas ionizzato riscaldato da stelle giovani e calde che sono numerose in questa regione. Ha un disco circumnucleare di gas molecolare freddo.

Sgr A* è considerato il centro dinamico della nostra Galassia e contiene un buco nero con una massa di circa 3.7 milioni di masse solari. E' circondata da stelle che gli orbitano intorno a velocità (anche fino a 5000 km/sec) nettamente superiori a quelle delle normali orbite stellari.

Coordinate J2000: RA 17:45:40 -29:00:28

Flusso di Sgr A: 1000 Jy a 100 MHz

ALTRE RADIOSORGENTI "BRILLANTI" EXTRAGALATTICHE:

Virgo A (M87): Flux(1296 MHz) = 228.4 Jy ($z=0.004360$, 60 milioni di anni luce)

3C 286 : Flux(1400 MHz) = 14.7 Jy ($z= 0.849$, 10 miliardi di anni luce)

ALTRE RADIOSORGENTI DEL SISTEMA SOLARE:

La Luna emette una densità di flusso apprezzabile per gli strumenti amatoriali solo alle frequenze delle microonde (tipicamente nella banda dei 10 GHz), con radiazione di origine termica caratterizzata da intensità crescente con la frequenza. I pianeti invece, a causa dei bassi livelli di emissione, sono virtualmente inaccessibili agli strumenti dilettantistici, eccetto Giove che risulta essere una radiosorgente di straordinaria potenza alle lunghezze d'onda metriche. La sua emissione ha carattere sporadico e sembra il risultato di violenti

processi che hanno luogo nell'atmosfera del pianeta, collegati (e modulati) al moto del suo satellite Io. La potenza della radiazione decametrica di Giove è dell'ordine di milioni di Jy e può essere rivelata senza difficoltà da ordinari impianti per radiocomunicazioni amatoriali: essendo tuttavia a carattere sporadico, possono verificarsi giorni successivi di osservazione senza alcun risultato.