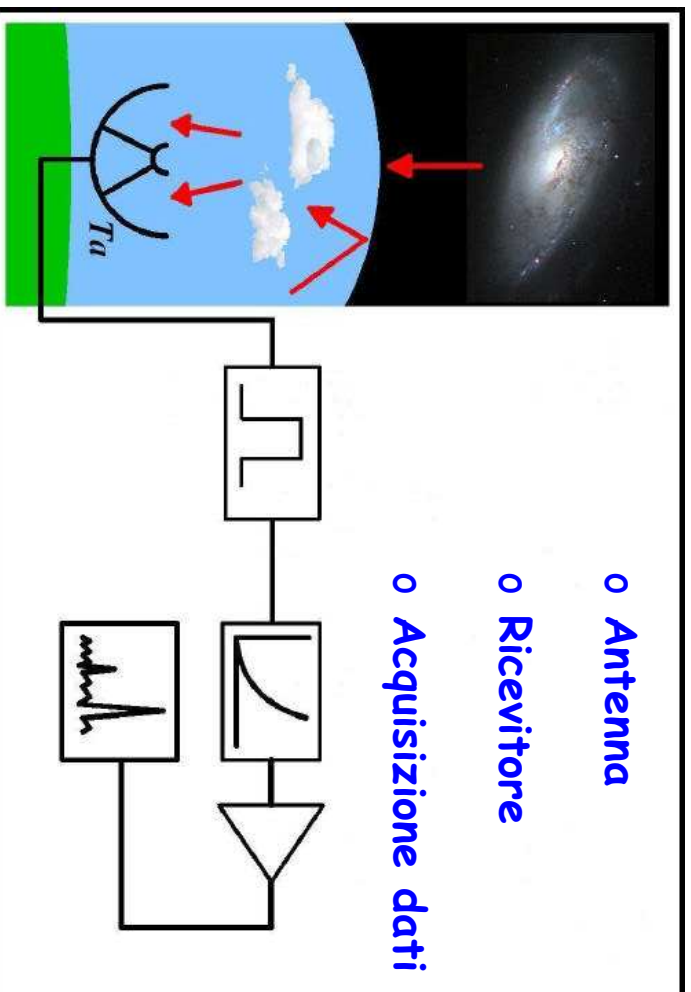


Introduzione al radiotelescopio ed elementi di elettronica



Relatore: Massimo Gervasi
Dipartimento di Fisica "G. Occhialini"
Università di Milano Bicocca

Schema di un radiotelescopio



Schema di un radiotelescopio

o Radiotelescopio

Un Radiotelescopio è un sistema in grado di ricevere e misurare le onde radio che interagiscono con l'antenna.

o Antenna

L'antenna è l'elemento che raccoglie le onde elettromagnetiche dall'esterno e le trasmette al rivelatore affinché possano essere rivelate.

o Ricevitore

Il ricevitore ha il compito di trattare il segnale raccolto dall'antenna, attraverso dei filtri in frequenza e degli amplificatori, e di rivelarlo sotto forma di segnale elettrico.

o Acquisizione dati

L'acquisizione dati permette di trasformare il segnale elettrico in valore numerico (digitale) nel modo più idoneo per essere registrato.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

3

Peculiarità di un radiotelescopio

o Antenna

Le antenne radio sono sensibili ad un singolo modo spaziale. Pertanto la risoluzione angolare è fissata dalla relazione: $A\Omega = \lambda^2$

Overo il fascio d'antenna (Ω) è determinato dall'apertura (A) del telescopio ed è funzione della lunghezza d'onda (λ).

o Ricevitore

I ricevitori radio sono sensibili al **campo elettrico** che viene raccolto dall'antenna. Si è in grado quindi di misurare sia l'ampiezza che la **fase** del segnale. Invece in ottico si è sensibili solo all'intensità.

o Banda spettrale

I sistemi radio lavorano fino a frequenze che oggi arrivano a $\nu \approx 10^{12}$ GHz ($\lambda \approx 0.5$ mm)

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

4

Funzioni dell'antenna

- o L'antenna è l'elemento che raccoglie le onde elettromagnetiche dall'esterno e le traduce in una grandezza che può essere rivelata: corrente o tensione elettrica.
- o L'antenna è la regione di transizione tra lo spazio libero e la regione di onde guidate (in guida o in cavo): la sua funzione è quindi assicurare che non ci siano perdite.
- o L'antenna inoltre definisce la regione di spazio da cui la radiazione viene raccolta.
- o L'antenna delimita anche l'intervallo spettrale della radiazione che può essere rivelata.
- o Il teorema di reciprocità ci dice che l'antenna si comporta nello stesso modo in ricezione ed in trasmissione.

➤ Per maggiori dettagli ⇒ **lezione #3 (Sironi)**

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

5

Funzioni del ricevitore

- o Il ricevitore ha il compito di trattare il segnale raccolto dall'antenna, prima che questo sia mandato al modulo di acquisizione.
 - o Il segnale viene filtrato, ovvero vengono accettate solo le frequenze che si trovano all'interno di una banda opportunamente scelta.
 - o Il segnale viene amplificato, attraverso l'uso di particolari dispositivi (**transistori**) che lavorano a radiofrequenza.
 - o Infine il segnale viene "rivelato", ovvero il segnale RF viene trasformato in un segnale DC, attraverso l'uso di un dispositivo (**diodo**) che raddrizza le onde.
 - o In genere a valle del detector si utilizza uno stadio di integrazione che serve a smorzare le fluttuazioni del segnale (**rumore**) su tempi scala brevi.
 - o A questo punto il segnale è pronto per essere acquisito.
- Per maggiori dettagli ⇒ **lezione #4 (Tartari)**

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

6

Funzioni dell'acquisizione dati

- o Il segnale dopo essere stato "raddrizzato" e "integrato" è diventato stabile ed idoneo ad essere acquisito.
- o Prima però occorre che esso sia trasformato da segnale analogico (tensione in Volt) in un segnale digitale (bits o Bytes). Il compito di fare ciò è del **Convertitore Analogico-Digitale (ADC)**.
- o Il segnale digitale viene quindi "parcheggiato" in una memoria temporanea (**buffer**) che ne conserva l'informazione fino a quando non viene trasferito su una memoria stabile.
- o Il rate di campionamento viene fissato da un "**clock**" che comanda il computer che gestisce l'acquisizione: il computer ad intervalli periodici interroga il buffer e scarica il suo contenuto sulla memoria permanente.
- o I segnali memorizzati sono ora pronti per essere letti e analizzati dal radioastronomo.
- o In genere vengono acquisiti, oltre al segnale misurato dal ricevitore, anche altre grandezze che aiutano nell'analisi successiva: tempo, posizione in cielo, segnali ausiliari, etc.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

7

Propagazione di un segnale RF

- o Il segnale RF si propaga nello spazio libero (nel vuoto) così come anche in un mezzo trasparente ed anche in "ambienti" in cui la sua propagazione è "guidata".
- o La **propagazione guidata** avviene solitamente in **guida d'onda**, in **cavo** ed anche attraverso elementi ottici (**specchi e lenti**).
- o In ognuna di queste situazioni occorre poter valutare in che modo il segnale viene attenuato nel corso della propagazione.
- o Ad esempio nello spazio vuoto le onde elettromagnetiche si propagano in modo tale che l'energia totale trasportata è conservata. Però una sorgente compatta che emette in modo isotropo distribuisce la sua energia su una superficie $S=4\pi r^2$. Pertanto allontanandosi dalla sorgente **l'intensità osservata diminuisce come $1/r^2$** .
- o Invece attraverso un mezzo, oppure in situazioni "guidate", nel corso della propagazione si hanno perdite dovute sia a fenomeni di **dissipazione** che a fenomeni di **dispersione**:
$$S_{\text{trasmesso}} = S_{\text{totale}} - S_{\text{riflesso}} - S_{\text{assorbito}}$$

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

8

Propagazione di un segnale RF: attenuazione per dissipazione

- o Il segnale RF può venire attenuato se durante la sua propagazione parte della sua energia viene assorbita.
- o Ciò può accadere sia quando le onde si propagano in un mezzo, come può essere l'atmosfera terrestre o una nube di materiale diffuso (come le nubi interstellari).
- o Il fenomeno dell'assorbimento di energia si ha anche per le onde guidate: in questo caso sono i materiali con cui interagisce l'onda che ne dissipano l'energia.
- o Le perdite avvengono, di norma, a causa della resistenza elettrica finita dei cavi o delle guide che propagano il segnale, ovvero degli specchi che lo riflettono.
- o Nel caso delle lenti è il materiale dielettrico di cui sono fatte che assorbe la radiazione e che le rende non completamente trasparenti. Allo stesso modo accade anche alle nubi interstellari.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

9

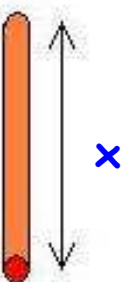
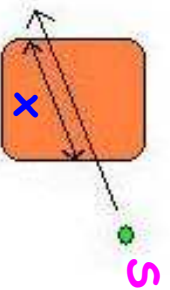
Attenuazione dei segnali (1)

Nella sua propagazione, in un mezzo o in un dispositivo di spessore dx , il segnale S proveniente da una sorgente viene attenuato di una quantità dS :

$$dS = -S \alpha dx$$

Qui α è la attenuazione per unità di lunghezza. Integrando su uno spessore finito si ottiene:

$$S(x) = S_0 e^{-\alpha x} = S_0 e^{-\tau}$$



30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

10

Attenuazione dei segnali (2)

Il parametro τ viene chiamato **profondità ottica** del mezzo (o del dispositivo).

Un mezzo è **trasparente** quando $\tau \ll 1$. In questo caso si può usare l'approssimazione:

$$S(x) = S_0 e^{-\tau} = S_0 (1-\tau) \sim S_0$$

Invece quando $\tau \gg 1$ il mezzo viene detto **opaco**. In tal caso si ha:

$$S(x) \rightarrow 0$$

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

11

Perdite per disadattamento

Alle perdite per dissipazione vanno aggiunte quelle per dispersione, intendendo che la radiazione continua ad essere presente ma viene indirizzata lontano dal punto dove può essere utilizzata.

Nella gran parte dei casi questo avviene in fenomeni riconducibili ad una **riflessione** che la radiazione subisce nel mezzo entro cui si propaga e pertanto si parla di perdite per riflessione.

Fenomeni di riflessione avvengono di solito quando si è in presenza di una **discontinuità**: ad esempio sulla superficie di un materiale che dovrebbe trasmettere la radiazione.

Questi fenomeni avvengono sia nei mezzi diffusi, normalmente ove sia presente una **disomogeneità**, che nei dispositivi (cavi, guide, etc.), nei punti di **connessione**, sia in ingresso che in uscita.

Si parla di **linea di trasmissione** riferendosi sia ai dispositivi che ai mezzi in cui un segnale si propaga.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

12

Impedenza caratteristica di una linea

Per analizzare quantitativamente le perdite per riflessione si introduce il concetto di **impedenza caratteristica della linea**. Questa rappresenta l'impedenza che la radiazione "sente" mentre si propaga.

Per ogni linea e per ogni situazione è possibile definire una impedenza caratteristica Z_0 .

Nel vuoto (propagazione libera) si definisce $Z_0 = \sqrt{(\mu_0/\epsilon_0)} = 377 \Omega$

In un mezzo (propagazione libera) si ha: $Z_0 = \sqrt{(\mu/\epsilon)} = 377/\sqrt{\epsilon_r} \Omega$

Nei dispositivi l'impedenza caratteristica dipende dai materiali usati ed anche dalla geometria. Materiali e geometria determinano i valori dei parametri elettrici della linea, ovvero: Capacità (C), Induttanza (L) e Resistenza (R).

In una **linea non-dissipativa**, ovvero quando è possibile trascurare le perdite per assorbimento (e quindi la resistenza $R=0$), l'impedenza caratteristica è data dalla relazione:

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

13

Adattamento di impedenza di una linea

Le perdite per riflessione si possono facilmente calcolare se immaginiamo di avere un segnale che si propaga in una linea, ad esempio un cavo, e questa è "**terminata**" con un "**carico**", ad esempio una resistenza Z_L .

Il calcolo si fa partendo da una tensione V e da una corrente I che si stanno propagando nella linea. Si assume ora di avere un'onda (di V ed I) che si riflette alla connessione tra la linea e il carico. Utilizzando la definizione di impedenza caratteristica si ottiene il coefficiente di riflessione:

$$\rho = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0)$$

La linea risulta "**adattata**" se $Z_L = Z_0$. In questo caso si ha $\rho = 0$ e non si hanno perdite per riflessione. Quindi per evitare perdite occorre evitare che ci siano variazioni nell'impedenza che l'onda sente mentre si propaga.

La linea risulta completamente disadattata se $Z_L = 0$, ovvero la linea è chiusa con un "**corto circuito**"; in questo caso $\rho = 1$ e si ha riflessione completa.

La linea risulta completamente disadattata se $Z_L = \infty$, ovvero la linea è chiusa con un "**aperto**"; in questo caso $\rho = -1$ e di nuovo si ha riflessione completa.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

14

Esempio di linea di trasmissione

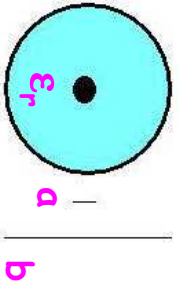
Esempi pratici di linee di trasmissione sono i cavi elettrici: il semplice doppio o il cavo coassiale.

Ciascun tipo di cavo ha una sua propria impedenza caratteristica, determinata dalla geometria e dalle dimensioni, oltre che dai materiali.

Tra i cavi più utilizzati per propagare i segnali RF c'è il cavo coassiale. La ragione della sua diffusione è che la sua geometria (conduttore centrale completamente schermato dal conduttore esterno a massa) minimizza le perdite per irraggiamento.

Il rapporto tra il raggio del conduttore esterno (b) e quello del conduttore interno (a), insieme con la costante dielettrica dell'isolante, determina l'impedenza caratteristica del cavo coassiale:

$$Z_0 = (60/\sqrt{\epsilon_r}) \ln(b/a)$$



30 Settembre 2007

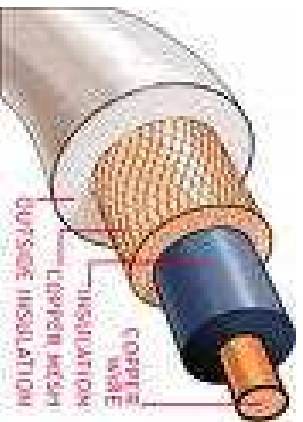
Radioastronomia di base per amatori

15

Esempio di cavo coassiale

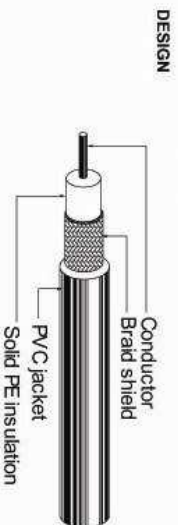
I cavi coassiali spesso sono usati per connettere l'antenna con il ricevitore: lo Z_0 del cavo deve accoppiarsi bene sia con l'antenna che con il ricevitore.

Esistono cavi di vario tipo e vanno scelti opportunamente per il valore di Z_0 , per l'attenuazione e per il range di frequenza a cui lavorano.



CONSTRUCTION

	Item	A.O.L.	Description
Conductor	No./mm 0.60	0.60 (± 0.012)	Sold bare copper
Insulation	No./mm 3.70 SPE	3.70 (± 0.13)	Solid PE insulation
Shield	No./mm 112/0.16	112 (±2); 0.16 (± 0.006)	Bare copper braid shield
Jacket	No./mm 6.20 PVC	6.20 (± 0.25)	Black PVC jacket



CHARACTERISTICS

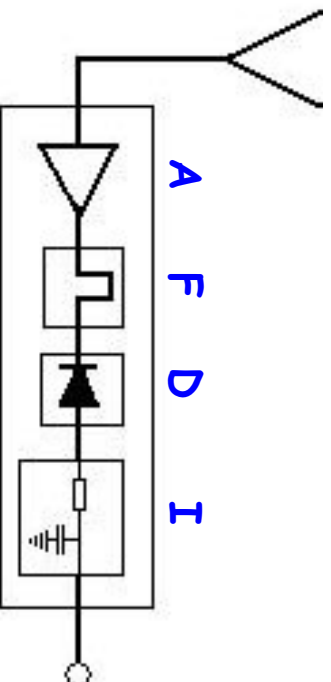
ITEM	Description	Standards	
Conductor Resistance	20°C, conductor DC resistance	<69.8Ω/KM	
Insulation Resistance	20°C, insulation resistance	>500MΩ/M	
Rated Temperature		70°C	
Rated Voltage		30V	
Braid Coverage		>95.0%	
Capacitance		67 ± 5pF/M	
Velocity Ratio		66.6 ± 3%	
Characteristic Impedance	20°C, 200MHz	75Ω ± 5Ω	
Attenuation	20°C, -dB/100M (± 10%)	3.61	
		400MHz	23.8
		1000MHz	39.3

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

16

Ricevitore diretto



Il ricevitore radio più semplice comprende i seguenti elementi:

- o **Amplificatore (A)**: è un transistor funzionante alla RF.
- o **Filtro (F)**: un circuito risonante (LC) che seleziona la banda passante.
- o **Detector (D)**: un diodo a legge quadratica.
- o **Integratore (I)**: circuito RC che funziona da filtro passa-basso.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

17

Detector a legge quadratica

Il Detector è un diodo con caratteristica molto prossima ad una legge quadratica:

$$I_{out} \propto < V_{in}^2 >$$

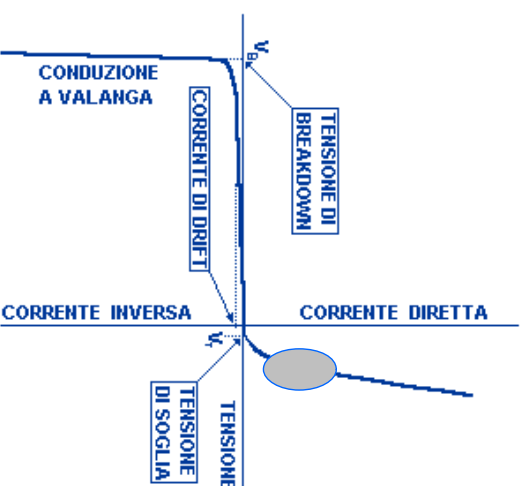
Ciò si verifica nel ramo a polarizzazione diretta.

Ricevitore Total Power:

la tensione in uscita risulta quindi proporzionale alla potenza in ingresso e quindi alla temperatura di antenna:

$$V_{out} \propto I_{out} \propto V_{in}^2 \propto W_{in} \propto T_A$$

$$W_{in} = kT_A \Delta\nu$$



30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

18

Filtri

I filtri passa banda utilizzati in un ricevitore si basano sul semplice circuito risonante LC. In questo circuito si ha una banda passante centrata intorno alla frequenza:

$$\omega = 1/\sqrt{LC}$$

I filtri normalmente usati sono combinazioni di diversi circuiti LC a frequenze leggermente diverse. In tal modo si riesce ad ottenere un filtro con le seguenti caratteristiche:

- **risposta** relativamente **piatta** all'interno della banda passante;
- **decremento rapido** ai bordi della banda;
- **reiezione elevata** al di fuori di questa.

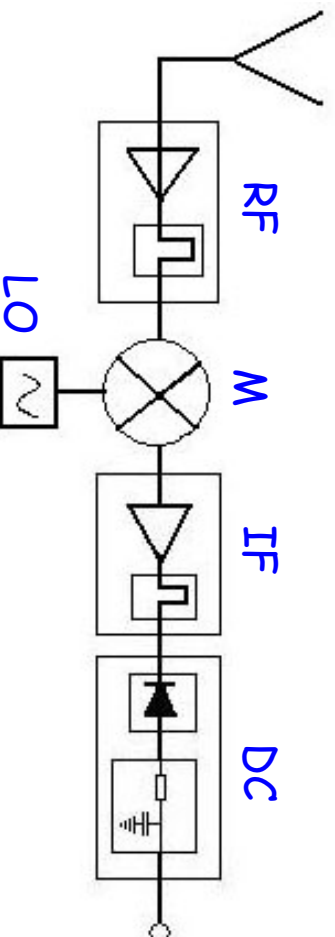
Inoltre i filtri vengono spesso accoppiati agli amplificatori. Questo allo scopo di aumentarne l'efficienza.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

19

Ricevitore Supereterodina (1)



- o **Sezione RF**: Amplificatore e Filtro in banda RF
- o **Mixer (M)**: combina i segnali dall'antenna e dal LO
- o **Sezione IF**: Amplificatore e Filtro in banda IF.
- o **Sezione DC**: Detector e Integratore.
- o **Oscillatore Locale (LO)**: Sorgente alla frequenza ν_0 .

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

20

Ricevitore Supereterodina (2)

Il Mixer è un elemento non-lineare (di solito un diodo) in grado di combinare campi elettrici di diversa frequenza: ovvero il segnale RF proveniente dall'antenna V_{RF} e il segnale prodotto dal LO V_0 .

Dopo il mixer sono presenti segnali con varie combinazioni di frequenze: tra questi ci sono le frequenze somma e differenza tra V_{RF} e V_0 .

Il segnale che interessa è quello alla frequenza differenza (V_{IF}), che è più facile da processare nei passi successivi. Per estrarlo si usa un filtro passa banda:

$$V_{IF} = |V_{RF} - V_0|$$

La banda del segnale IF risulta la stessa del segnale RF:

$$\Delta V_{IF} = \Delta V_{RF}$$

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

21

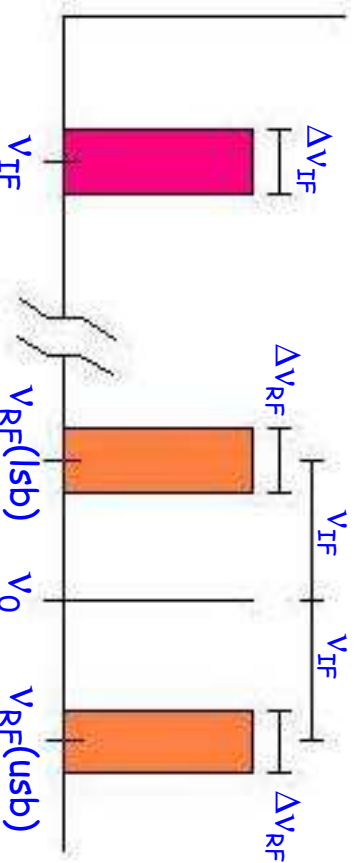
Ricevitore Supereterodina (3)

Ricevitore Double-Side Band (DSB): se il segnale RF non viene filtrato, dopo la conversione si ha un segnale proveniente da due diverse bande:

$$V_{RF}(lsb) = V_0 - V_{IF}$$

$$V_{RF}(usb) = V_0 + V_{IF}$$

Ricevitore Single-Side Band (SSB): se si vuole avere una frequenza ed una banda ben definita, bisogna filtrare il segnale RF ed escludere una delle due bande simmetriche intorno a V_0 .



30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

22

Mixer: conversione della frequenza

Quando due onde (RF e LO) si propagano in un dispositivo non lineare si ha un accoppiamento tra queste e la comparsa di frequenze diverse da ν_0 e ν_{RF} .

Un esempio di mixer è il diodo a legge quadratica:

$$I = \alpha E^2$$

Il segnale in ingresso è composto dalla somma del segnale dell'antenna (E_{RF}) e dell'oscillatore locale (E_{LO}):

$$I = \alpha (E_{RF} \sin(\omega_{RF} t + \phi_{RF}) + E_{LO} \sin(\omega_0 t + \phi_0))^2$$

Sviluppando il quadrato e utilizzando le formule di addizione trigonometriche si ottiene:

$$\begin{aligned} I &= (1/2) \alpha (E_{RF}^2 + E_{LO}^2) && \Rightarrow \text{dc} \\ &- (1/2) \alpha E_{RF}^2 \sin(2\omega_{RF} t + 2\phi_{RF} + \pi/2) && \Rightarrow 2\omega_{RF} \\ &- (1/2) \alpha E_{LO}^2 \sin(2\omega_0 t + 2\phi_0 + \pi/2) && \Rightarrow 2\omega_0 \\ &- \alpha E_{RF} E_{LO} \sin((\omega_{RF} + \omega_0) t + \phi_{RF} + \phi_0 + \pi/2) && \Rightarrow \omega_{RF} + \omega_0 \\ &+ \alpha E_{RF} E_{LO} \sin((\omega_{RF} - \omega_0) t + \phi_{RF} - \phi_0 + \pi/2) && \Rightarrow \omega_{IF} \end{aligned}$$

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

23

Rumore di un ricevitore

La potenza totale misurata dal ricevitore (W_{sys}) è data dalla somma della potenza in ingresso sull'antenna (W_A) e la potenza di rumore del ricevitore (W_N):

$$W_{sys} = W_A + W_N$$

$$W_A = k T_A \Delta\nu \quad W_N = k T_N \Delta\nu$$

In termini di temperatura si ha:

$$T_{sys} = T_A + T_N$$

Il segnale registrato risulta quindi:

$$S_{out}(ADU) = G T_{sys}$$

G è detto guadagno del ricevitore.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

24

Rumore dei componenti passivi

Tutti i componenti del ricevitore contribuiscono alla temperatura di rumore.

Un componente passivo contribuisce in funzione della sua attenuazione.

Abbiamo già visto come il segnale di una sorgente viene attenuato da un dispositivo che attenua. Lo stesso dispositivo inoltre riemette una potenza di rumore proprio in funzione della sua attenuazione (o della profondità ottica).

$$W dv = (1 - e^{-\tau}) k T_0 dv$$

Qui T_0 è la temperatura fisica del dispositivo. La temperatura di rumore introdotta risulta pertanto:

$$T_N = (1 - e^{-\tau}) T_0$$

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

25

Rumore di una catena di amplificazione

Normalmente si utilizzano diversi amplificatori in cascata (RF, IF e DC) per un totale di 80-100 dB di guadagno.

L'amplificazione totale è il prodotto dei singoli amplificatori:

$$G_{\text{tot}} = \prod G_i$$

Ogni amplificatore inoltre contribuisce alla temperatura di rumore del ricevitore. Il rumore del singolo amplificatore viene poi amplificato dai dispositivi che si trovano a valle di esso.

È evidente che il primo amplificatore (alla frequenza RF) è quello più critico, poiché il suo rumore viene amplificato dalla catena completa. Questo deve avere una temperatura di rumore il più possibile bassa.

Gli altri dispositivi che stanno a valle sono meno critici e possono essere intrinsecamente più rumorosi.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

26

Strategie di osservazione

Occorre tenere conto che esiste una differenza profonda tra un radiotelescopio ed un telescopio ottico. Infatti il radiotelescopio di solito utilizza un singolo rivelatore, mentre al piano focale di un telescopio ottico si usa porre un CCD.

Quando si osserva una sorgente in ottico, di norma, si punta la sorgente e poi si integra semplicemente inseguendone il moto apparente. La sorgente viene messa in evidenza dal confronto con i pixel non illuminati.

Nel caso di un radiotelescopio si ha a disposizione un solo "pixel" e non è possibile adottare la stessa strategia. Per evidenziare una sorgente è comunque sempre necessario il confronto con il segnale "off-source".

E necessario quindi predisporre una strategia osservativa in cui il radiotelescopio sia puntato sia sulla sorgente che fuori da questa.

La strategia più semplice è il **drift-scan**, ovvero si tiene fermo il telescopio in una posizione tale per cui la sorgente in un certo intervallo di tempo attraversa il fascio d'antenna uscendo dal lato opposto.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

27

Segnale e rumore (1)

Quando si analizza il segnale acquisito in tempi diversi occorre tenere conto che il segnale misurato dal ricevitore può variare, anche se la sorgente è costante.

Ci sono diverse motivi per cui questo può accadere, sia esterne all'apparato che interne ad esso.

Tra le cause esterne vi sono: l'**atmosfera** (a frequenze sufficientemente alte) e le **interferenze radio** di natura artificiale.

Tra le cause interne va ricordato che molti **dispositivi** (transistor, diodi, etc.) sono **sensibili alla temperatura**. Pertanto può variare il guadagno e la temperatura di rumore del ricevitore.

Alcune tecniche per minimizzare questi inconvenienti sono:

- Effettuare molte **scansioni rapide** sulla sorgente, compatibilmente con il rapporto segnale-rumore
- **Termostatare i componenti** sensibili alla temperatura.

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

28

Segnale e rumore (2)

In molti casi può capitare di dover effettuare una "pulizia" del segnale, ovvero dover separare gli effetti spuri dal segnale della sorgente.

Per quanto detto il segnale totale misurato è dato da vari contributi:

$$T_{Ant} = T_S + T_{Atm} + T_{RFI} + T_N$$

Di seguito si mostrano alcuni segnali misurati in Bicocca con una parabola da 3 metri di diametro a 2.5 GHz.

Tra questi si fanno vedere:

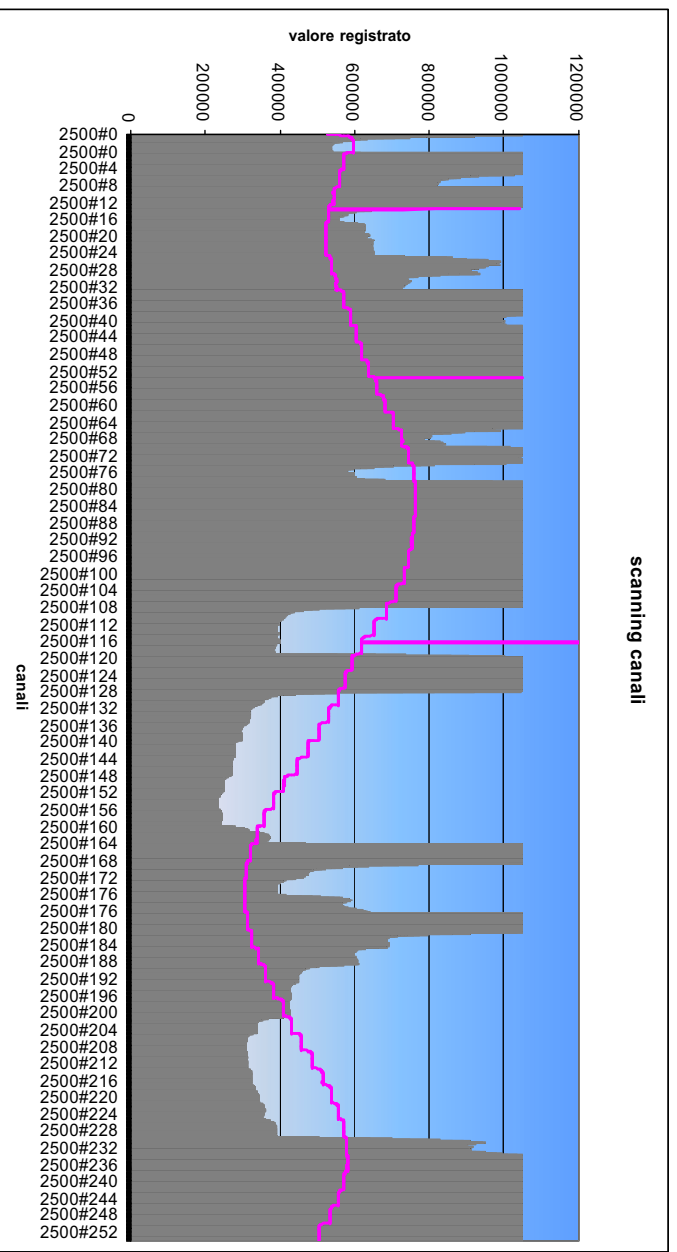
- Effetti delle interferenze radio
- Segnale del Sole
- Segnale della Luna
- Segnale del Piano della Galassia
- Variazione di segnale dovuta ad effetti strumentali

30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

29

Esempi di segnali (1)

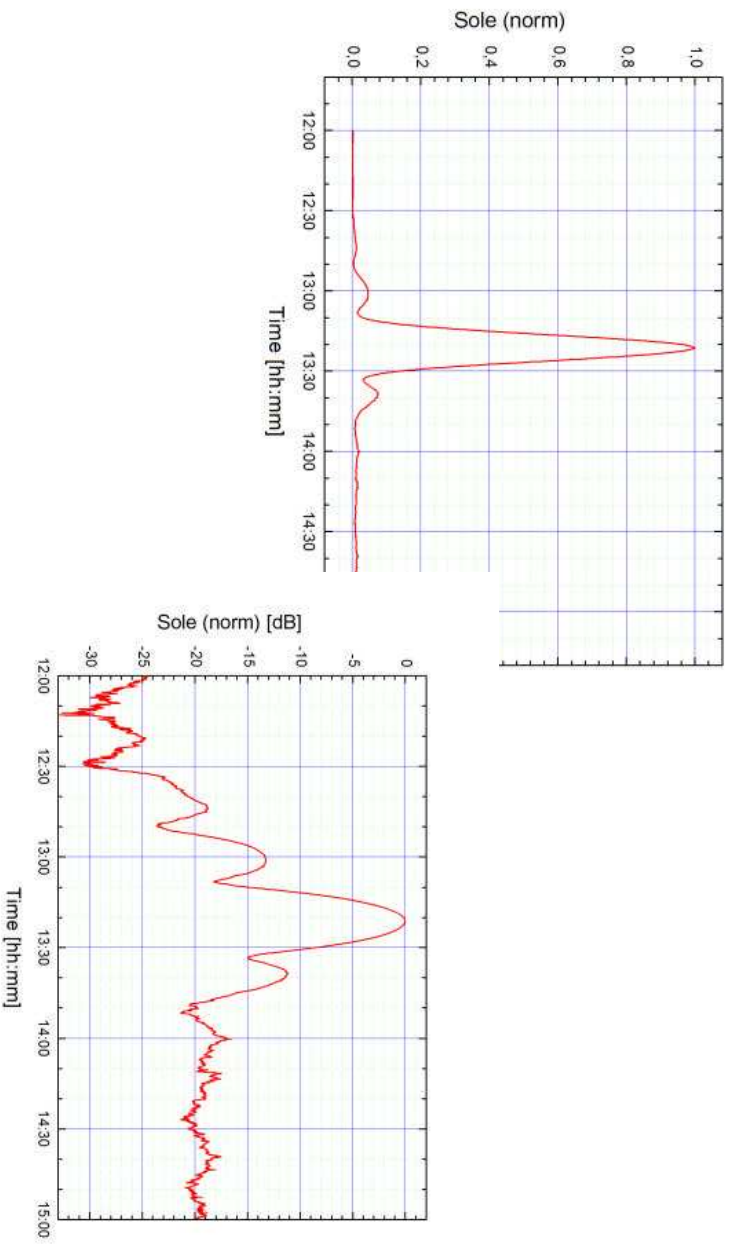


30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

30

Esempi di segnali (2)

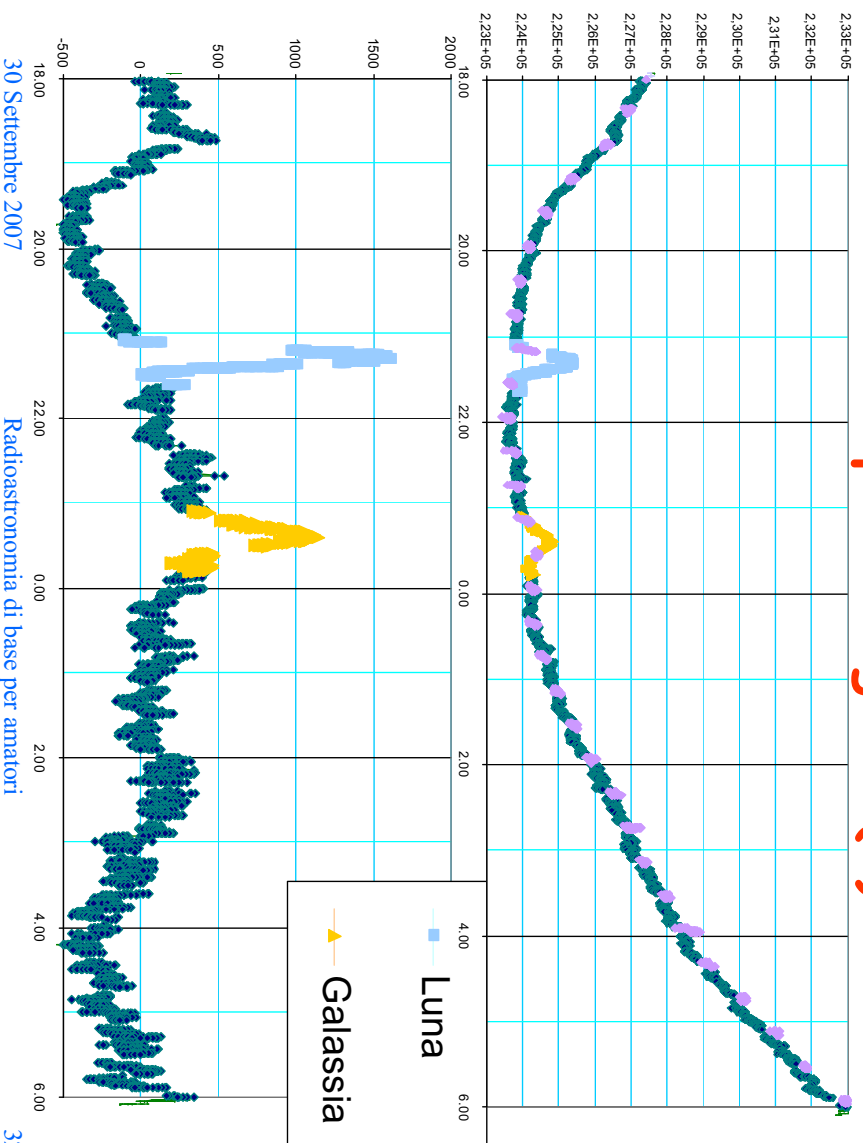


30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

31

Esempi di segnali (3)



30 Settembre 2007

Radioastronomia di base per amatori

32

Esempi di segnali (4)

