

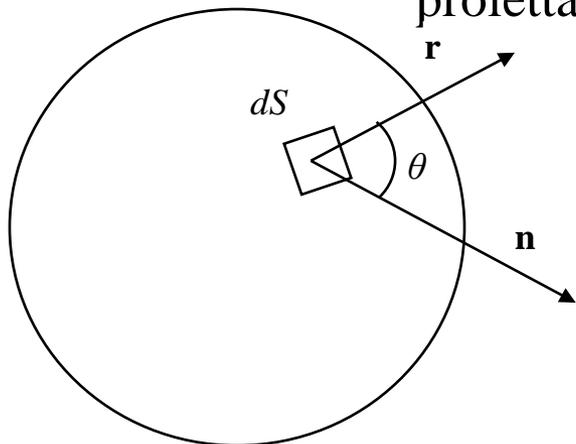
# Grandezze radiometriche

La *Radiometria* ha per oggetto la misurazione dell'energia irradiata da una o più sorgenti in una qualunque regione dello spettro elettromagnetico.

Si consideri una sorgente di radiazione *estesa* (non *puntiforme*), *di superficie* (sorgente la cui emissione è proporzionale alla sua superficie). Sia  $dS$  un elemento infinitesimo della superficie emittente e si consideri la potenza irradiata all'interno dell'angolo solido  $d\Omega$  attorno ad una direzione  $\mathbf{r}$  che formi un angolo  $\theta$  con il versore  $\mathbf{n}$  normale a  $dS$ . La potenza  $dP$  emessa dall'elemento  $dS$  è proporzionale a  $d\Omega$  e alla superficie “visibile” ovvero

proiettata sul piano normale a  $\mathbf{r}$ , uguale a  $\mathbf{r} \cdot \mathbf{n} dS = \cos \theta dS$ :

il coefficiente di proporzionalità  $L$  è detta *radianza* o *brillanza totale* della superficie nel punto in esame ed in corrispondenza alla direzione specificata dall'angolo  $\theta$ .



# Grandezze radiometriche

Quindi la *radianza* o *brillanza totale* è la potenza irradiata in una data direzione e per unità di angolo solido, dall'unità di superficie emittente proiettata sul piano normale alla direzione di emissione:

$$L = \frac{d^2 P}{d\Omega dS \cos \theta}$$

La *brillanza specifica* o più semplicemente *brillanza* è la radianza per unità di larghezza di banda:

$$B = \frac{dL}{d\nu} = \frac{d^2 P}{d\Omega d\nu dS \cos \theta}$$

# Legge di Radiazione di Planck

Tutti i corpi, a temperatura superiore allo zero assoluto, assorbono e reirradiano energia nella forma di onde elettromagnetiche . Un *corpo nero* assorbe la radiazione che incide su di esso a tutte le lunghezze d'onda e la brillantezza  $B$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{rad}^{-2}$ ) della radiazione che emette è fornita dalla Legge di Radiazione di Planck:

$$B = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

dove:

$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  = costante di Planck

$\nu$  = frequenza della radiazione (Hz)

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  = velocità della luce

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{°K}^{-1}$  = costante di Boltzmann

$T$  = temperatura del corpo nero (°K)

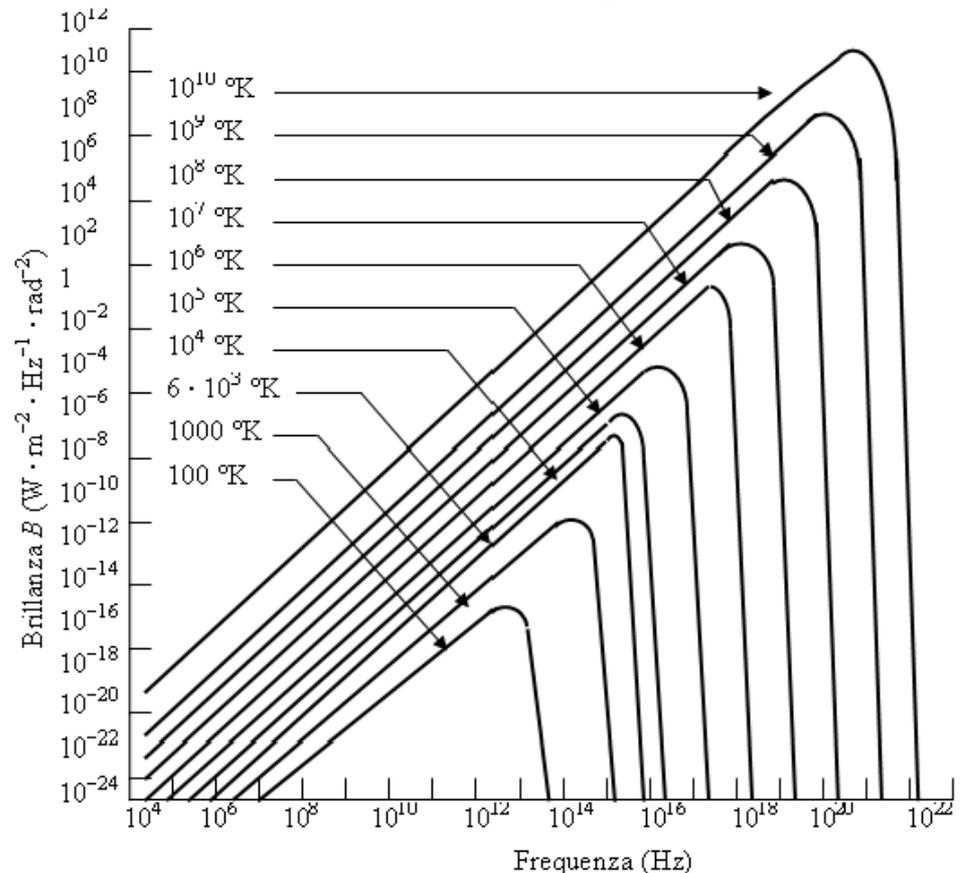
# Legge di Radiazione di Rayleigh - Jeans

Nel campo delle radiofrequenze  $h\nu \ll kT$ , quindi il denominatore del secondo fattore della legge di radiazione di Planck può essere sostituito dallo sviluppo secondo Taylor nell'intorno di  $\nu = 0$  troncato al termine del primo ordine ed espresso come:

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 = 1 + \frac{h\nu}{kT} - 1 = \frac{h\nu}{kT}$$

segue:

$$B = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{kT}{h\nu} = \frac{2\nu^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2}$$



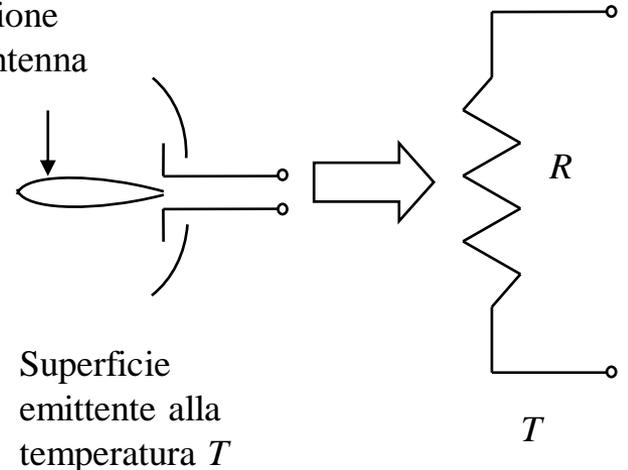
# Temperatura di rumore - relazione di Nyquist

Si consideri un'antenna avente area efficace  $A_e$  il cui fascio (di apertura  $\Omega_A$ ) intercetta una superficie (illimitata) a temperatura  $T$ . Nel campo delle radiofrequenze la superficie emette secondo la Legge di Radiazione di Rayleigh - Jeans e quindi la potenza di rumore  $P$  ricevuta dall'antenna vale (il fattore  $1/2$  è giustificato dal fatto che l'antenna riceve una sola delle due polarizzazioni della radiazione ricevuta):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{2kT}{\lambda^2} A_e \cdot \Omega_A \cdot \Delta\nu = kT\Delta\nu \text{ essendo in questo caso } \frac{A_e \Omega_A}{\lambda^2} = 1$$

e coincide con quella presente ai capi di un resistore che si trovi alla temperatura  $T$  e di valore uguale alla resistenza  $R$  di radiazione dell'antenna. La potenza di rumore ricevuta è direttamente proporzionale alla temperatura a cui si trova la superficie ed alla larghezza di banda  $\Delta\nu$  del ricevitore. Quindi l'antenna ed il ricevitore ad essa collegato possono misurare temperature di regioni distanti.

Diagramma di radiazione dell'antenna



# Temperatura di rumore di un due-porte

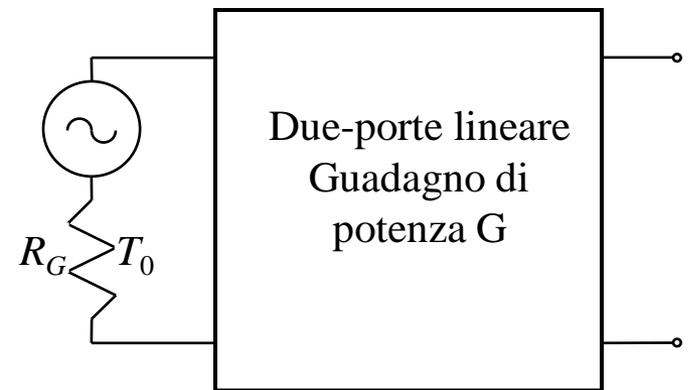
Si consideri un due-porte lineare avente guadagno di potenza  $G$  e si indichi con:

- $W_{GN} = GkT_0\Delta\nu$  la potenza di rumore erogata in uscita dal due-porte nella banda di frequenze  $\Delta\nu$  dovuta al rumore della resistenza  $R$  (che si trova alla temperatura di riferimento  $T_0$ ) del generatore posto al suo ingresso;
- $W_N$  la potenza di rumore erogata in uscita dal due-porte nella banda di frequenze  $\Delta\nu$  dovuta al rumore generato al suo interno; tale potenza può considerarsi generata, anziché dal due porte, da un resistore al suo ingresso posto ad una temperatura  $T$  tale che  $W_N = GkT\Delta\nu$ , detta *temperatura (puntuale) di rumore* del due-porte.

Si definisce *figura di rumore*  $F$  del due-porte:

$$F = \frac{W_{GN} + W_N}{W_{GN}} = 1 + \frac{T}{T_0} \quad \text{segue:}$$

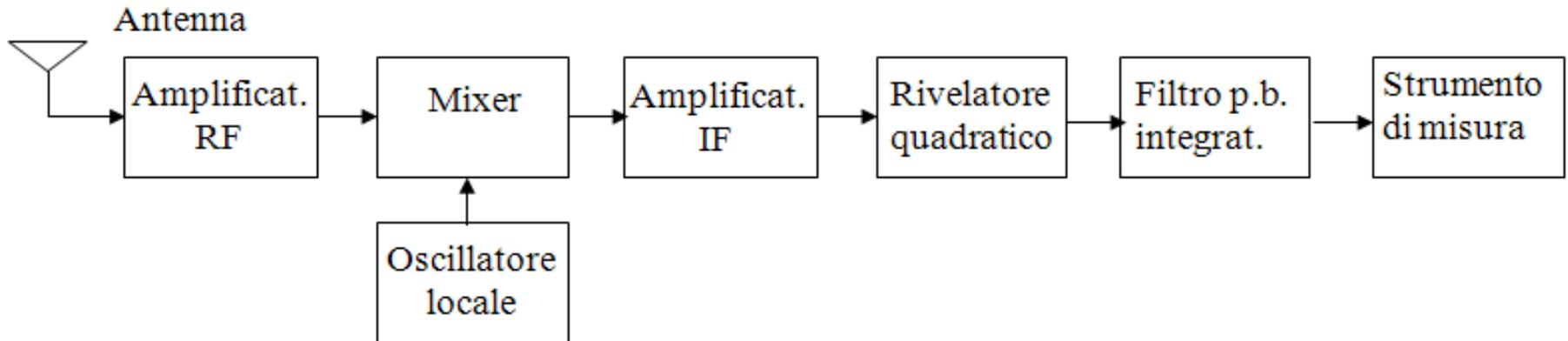
$$T = (F - 1)T_0$$



La figura di rumore viene talvolta espressa in dB (*cifra di rumore*).

# Ricevitore “total power”

Ogni ricevitore che misura la potenza totale di rumore proveniente dall'antenna (e dal ricevitore stesso) è detto ricevitore total power.



La potenza di rumore che si vuole misurare viene dapprima amplificata da un amplificatore a radiofrequenza. Lo stadio successivo è un mixer dove il segnale proveniente dall'amplificatore RF viene mescolato con quello generato da un oscillatore locale, in modo da ottenere in uscita un segnale a frequenza intermedia (IF) la cui potenza sia direttamente proporzionale alla potenza a radiofrequenza (ricevitore *eterodina*). Il segnale IF è assimilabile ad una onda portante modulata in modo casuale. Segue quindi un rivelatore a legge quadratica (la sua tensione continua di uscita è proporzionale alla potenza di rumore al suo ingresso) ed un integratore che compie una media sul segnale.

# Realizzazione di un ricevitore a microonde per la misura della radiazione emessa da corpi caldi

## dimostrativo e a basso costo

- Il blocco più critico di un apparecchio per radiometria a microonde è il ricevitore che, affinché il sistema sia molto sensibile e possa misurare differenze di campo elettromagnetico molto piccole, deve essere a basso rumore
- Si rendono quindi necessari, per la realizzazione del front-end del ricevitore, costosi amplificatori a basso rumore (LNA = Low Noise Amplifier)
- Da alcuni anni sono presenti sul mercato “consumer” componenti a basso costo dedicati alla ricezione della TV satellitare detti LNB = Low Noise Block che come sezione di front-end impiegano un amplificatore a basso rumore

# Descrizione di un LNB

- È costituito da un illuminatore a tronco di cono corrugato, due dipoli ortogonali fra loro, un doppio amplificatore di front-end (per le due polarizzazioni lineari) a bassissimo rumore, un mixer attivo, un oscillatore locale molto stabile a risonatore dielettrico (DRO), un filtro di banda, un amplificatore di media frequenza (IF) ed un dispositivo per la stabilizzazione della tensione di lavoro
- Le uscite dei due amplificatori sono collegate ad un sommatore e la selezione della polarizzazione del campo che si vuole ricevere avviene interdicendo con una opportuna tensione (derivata da quella di alimentazione uguale a 12 V o 18 V) il blocco amplificatore corrispondente alla polarizzazione indesiderata
- Il blocco LNB amplifica il segnale in ingresso (in una parte della banda Ku, ovvero nella banda di frequenze compresa fra 11 GHz e 12 GHz) e per mezzo dell'oscillatore locale lo converte alla media frequenza; il guadagno complessivo del blocco è circa 60 dB e la banda passante  $\Delta\nu$  è circa 1 GHz

# Caratteristiche ed utilizzazione dell'apparecchio

Alla frequenza  $\nu = 12$  GHz corrisponde una lunghezza d'onda ( $c =$  velocità della luce nel vuoto):

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{12 \cdot 10^9} = 25 \text{ mm}$$

Adottando la scelta progettuale di utilizzare come front-end di ricezione un LNB e come antenna un paraboloide per la ricezione della TV satellitare avente un diametro  $D = 60$  cm, l'apparecchio risultante avrà un potere risolutivo secondo il criterio di Rayleigh dato dal primo minimo di diffrazione del paraboloide:

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D} = 1,22 \frac{25 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-2}} = 0,05 \text{ rad} \approx 3^\circ.$$

La zona di Fraunhofer inizia ad una distanza dal paraboloide superiore a:

$$\frac{2 \cdot D^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0,6^2}{0,025} \cong 30 \text{ m.}$$

# Caratteristiche ed utilizzazione dell'apparecchio

Il costruttore del blocco LNB fornisce una cifra di rumore uguale a 0,5 dB, corrispondente ad una figura di rumore :

$$F = 10^{\frac{0,5}{10}} = 1,122$$

quindi la temperatura di rumore  $T_R$  del ricevitore vale:

$$T_R = T_0(F - 1) = 290(1,122 - 1) = 35,4 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (T_0 = \text{temperatura ambiente} \approx 290^\circ\text{K})$$

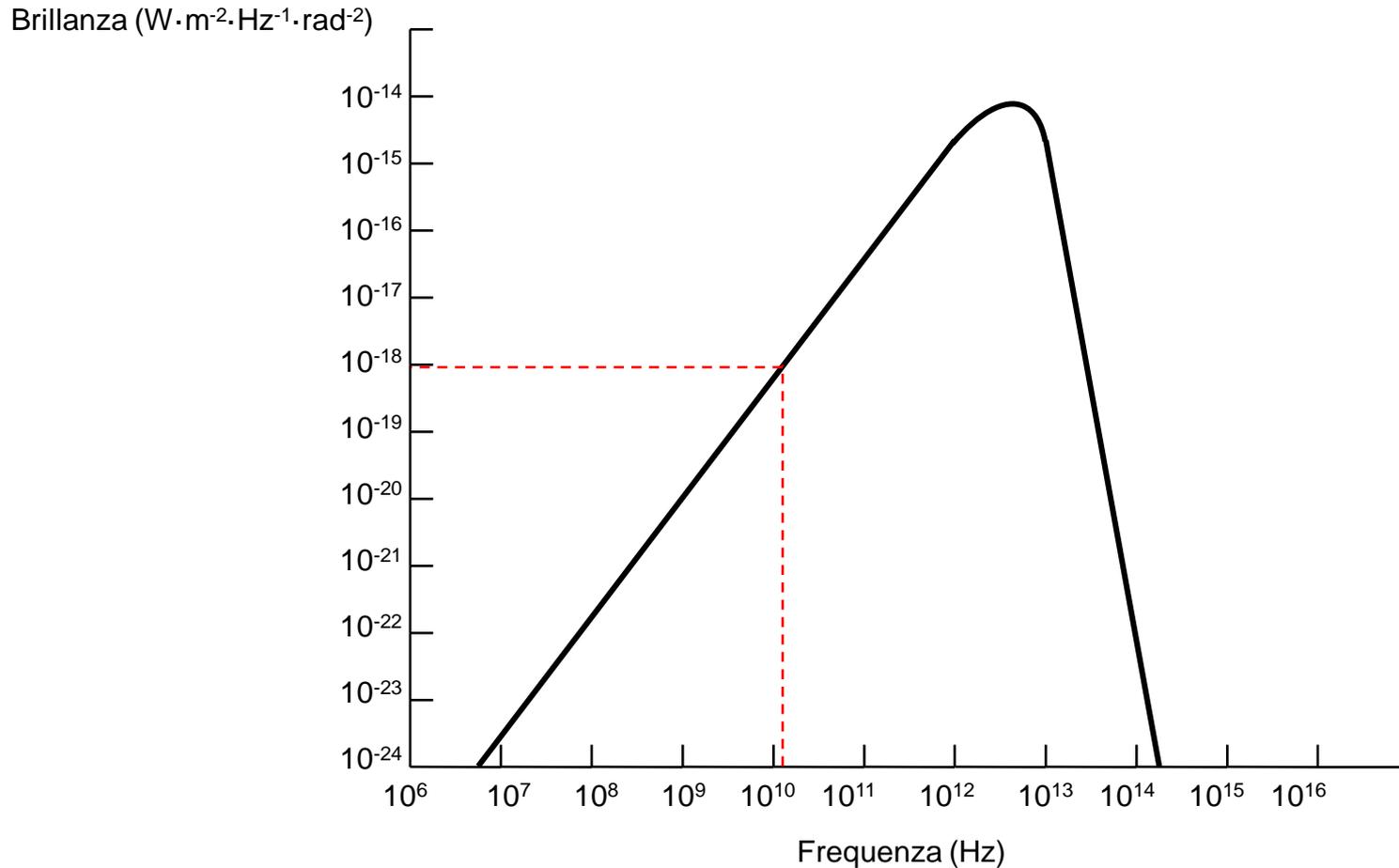
Volendo utilizzare l'apparecchio a fini dimostrativi dell'emissione umana, per la Legge di Radiazione di Planck, a 12 GHz di onde elettromagnetiche, in assenza di una persona davanti al paraboloide viene ricevuta la radiazione emessa dalla parete di fondo, che si suppone alla temperatura ambiente. Quindi la minima temperatura detectabile dal ricevitore vale:

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_R + T_{\text{Parete}}}{\sqrt{\Delta\nu \cdot \tau}} = \frac{35,4 + 290}{\sqrt{10^9 \cdot 10^{-2}}} \cong 0,1 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (\tau = \text{cost. di tempo dell'integratore})$$

L'applicazione è quindi possibile, in quanto il ricevitore è in grado di misurare la differenza fra la temperatura della parete di fondo e quella della persona ( $37^\circ\text{C} = 310^\circ\text{K}$ ) che si venisse a trovare davanti al paraboloide.

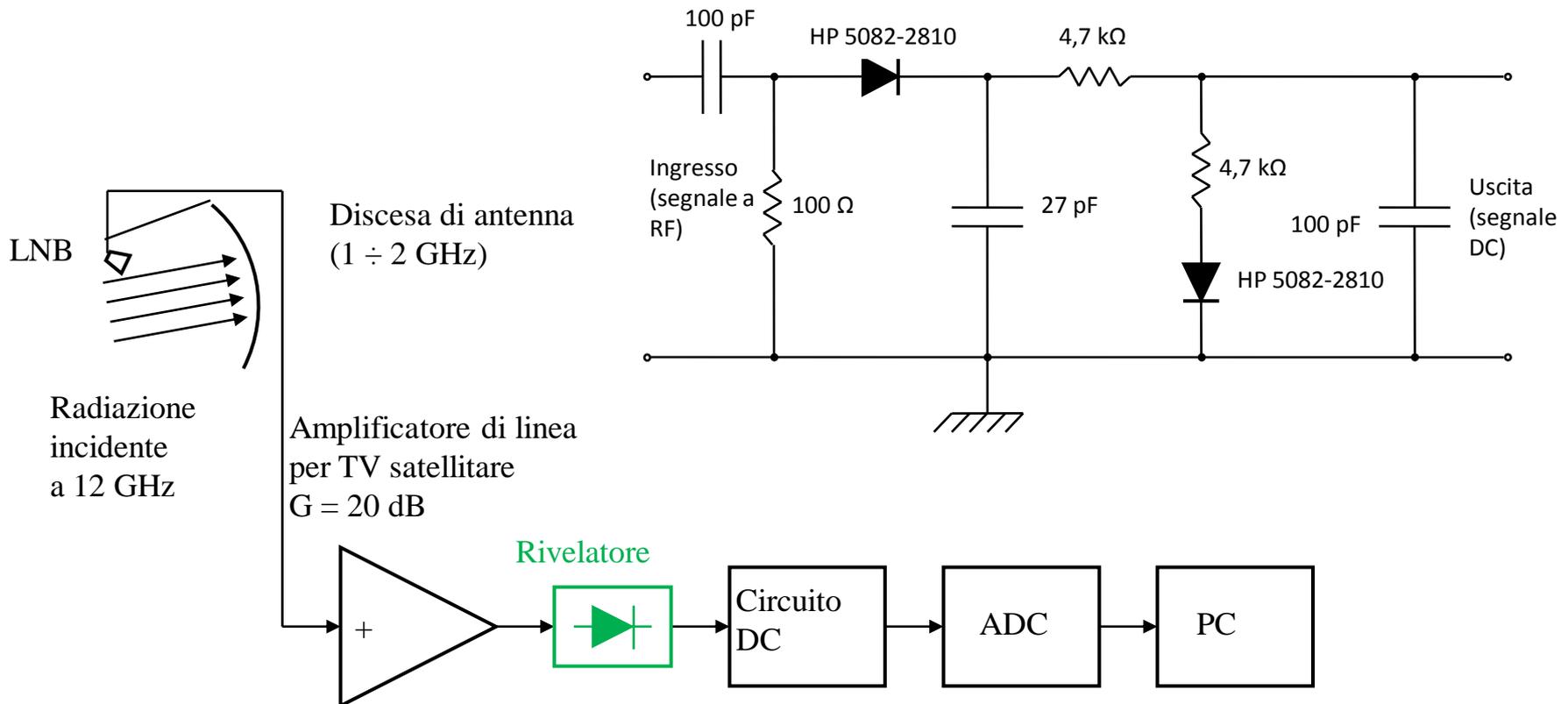
# Grafico della Legge di Radiazione di Planck a 310°K

con indicata la zona di funzionamento dell'apparecchio



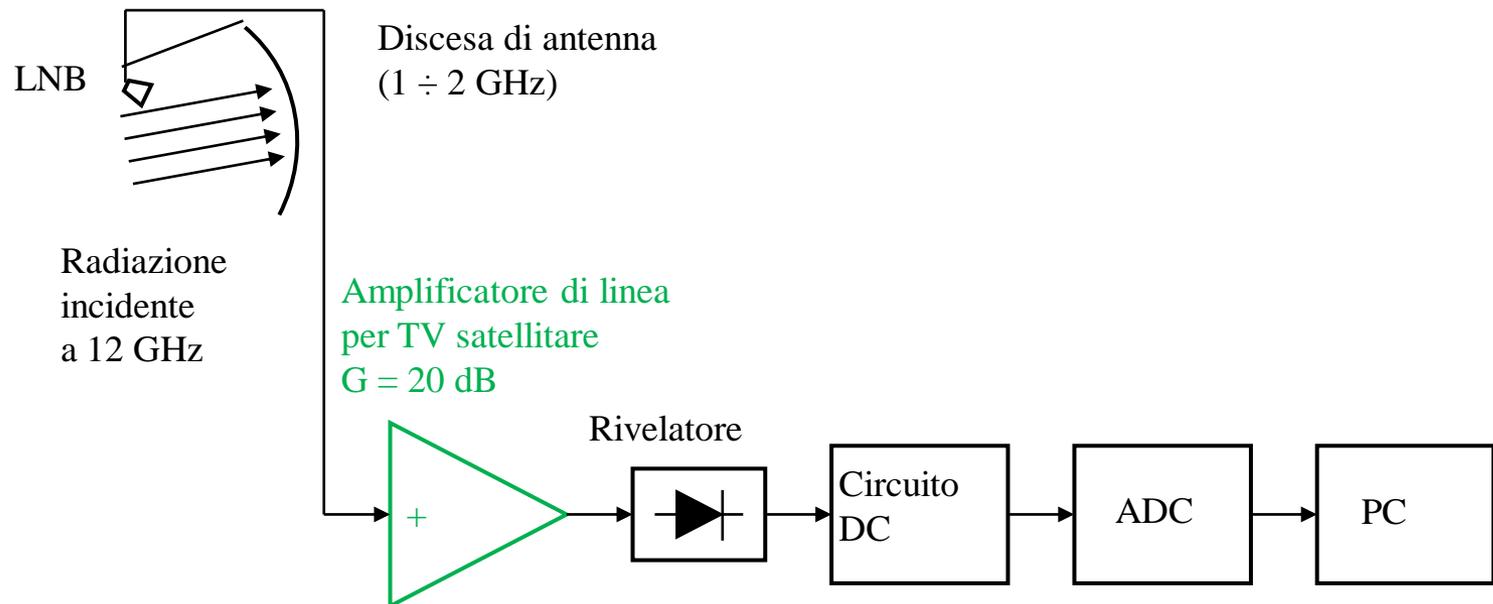
# Descrizione generale del sistema - sezione A.F.

La misura della potenza di rumore ricevuta dall'antenna avviene rivelando il segnale a radiofrequenza da essa proveniente per mezzo di un rivelatore a diodo. Quello utilizzato è concepito secondo uno schema che prevede la compensazione in temperatura.



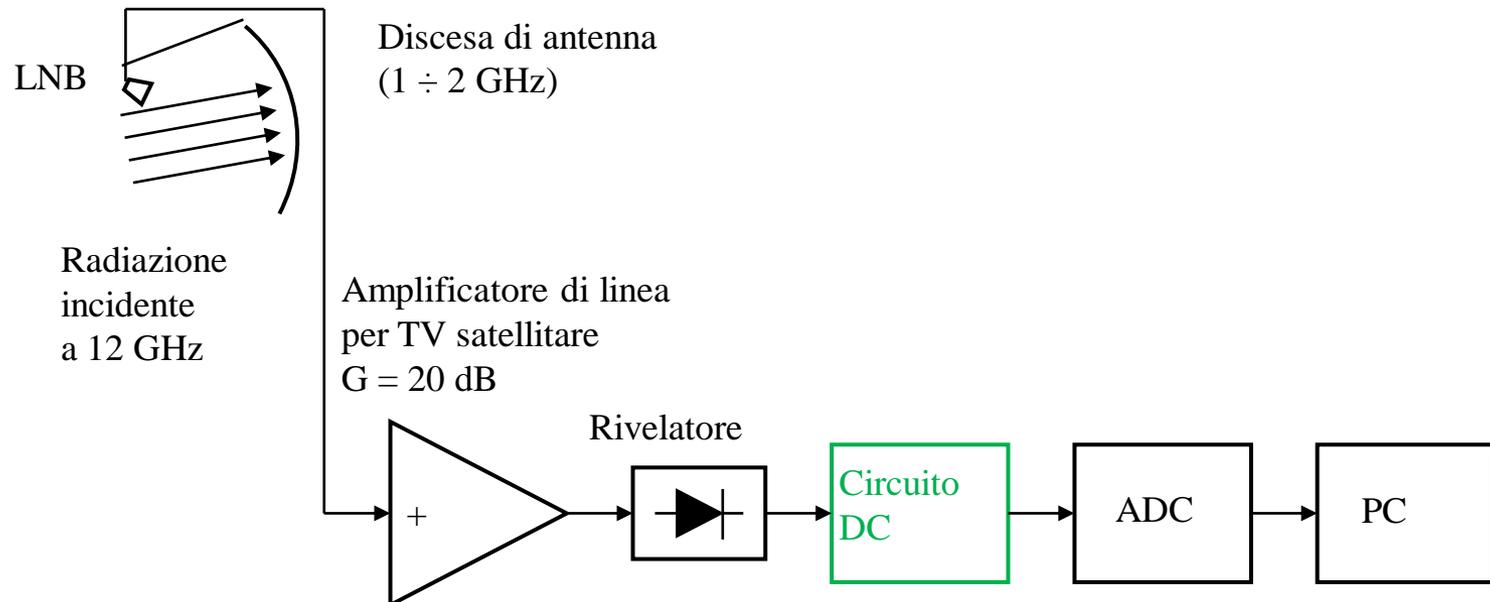
# Descrizione generale del sistema - sezione A.F.

Affinché il funzionamento del circuito rivelatore sia ottimo, la potenza di rumore posta all'ingresso di quest'ultimo dovrà essere ad un opportuno livello (0 dBm); a ciò si provvede inserendo fra LNB e rivelatore un "amplificatore di linea" (componente anch'esso a basso costo), che amplifica di 20 dB il segnale proveniente dal LNB. Questo amplificatore provvede anche all'alimentazione del blocco LNB attraverso la discesa di antenna.



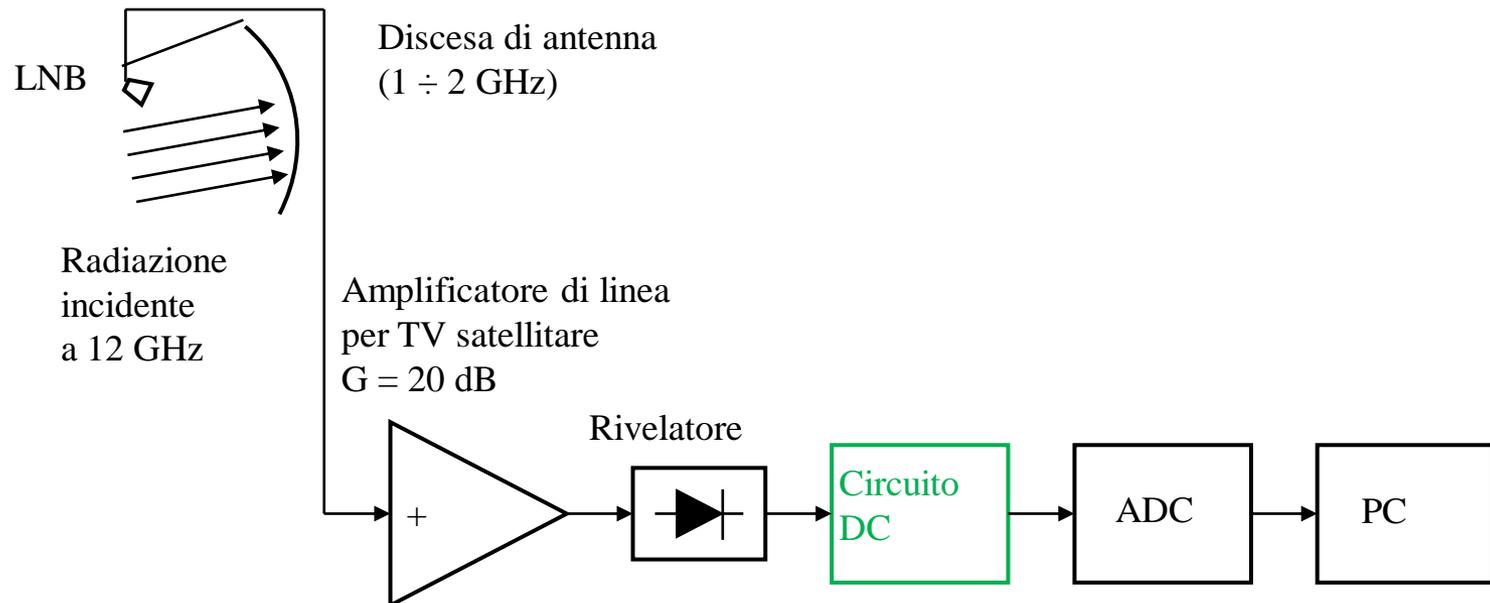
# Descrizione generale del sistema - sezione D.C.

L'uscita del rivelatore transita dapprima attraverso un circuito integratore che elimina le componenti rapidamente variabili del segnale rivelato: il suo inserimento impedisce l'apprezzamento delle rapide variazioni della potenza di rumore ma al contempo migliora la minima temperatura rivelabile dal ricevitore; il valore di compromesso per la sua costante di tempo è stata determinata sperimentalmente in 10 ms.

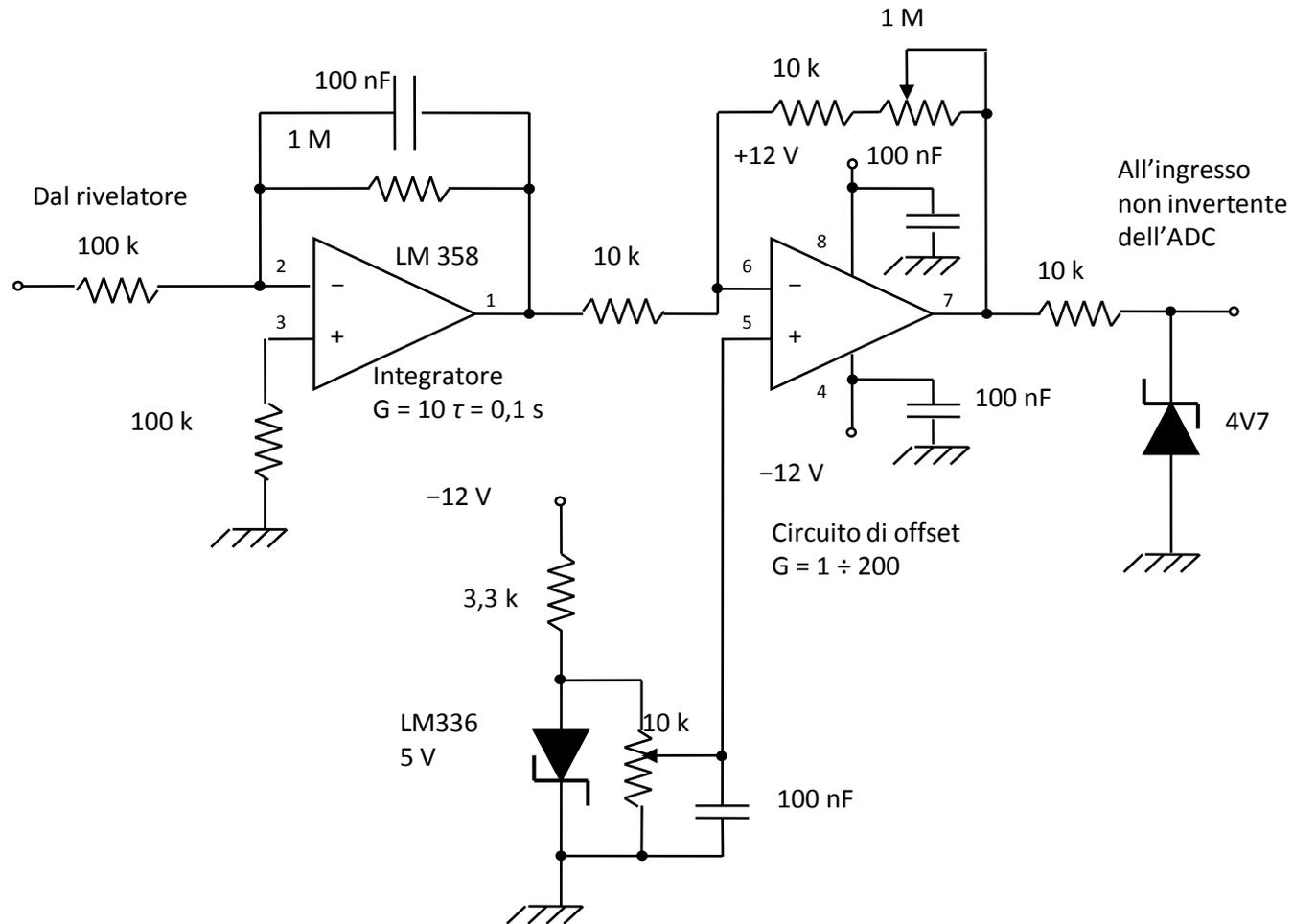


# Descrizione generale del sistema - sezione D.C.

Il traslatore di livello, posto a valle dell'integratore, è costituito da un circuito sommatore e permette di sottrarre (o sommare), attraverso una regolazione manuale, un livello di tensione continua al segnale rivelato: quando l'apparecchio sta ricevendo il solo fondo elettromagnetico, si può sottrarre al corrispondente livello di tensione in uscita dal rivelatore una uguale tensione, portando a zero l'indicazione dello strumento di misura, effettuando così una operazione di "off-set". In questo modo il radiometro misurerà la differenza fra la radiazione elettromagnetica di fondo e quella dell'oggetto verso cui è puntata l'antenna.

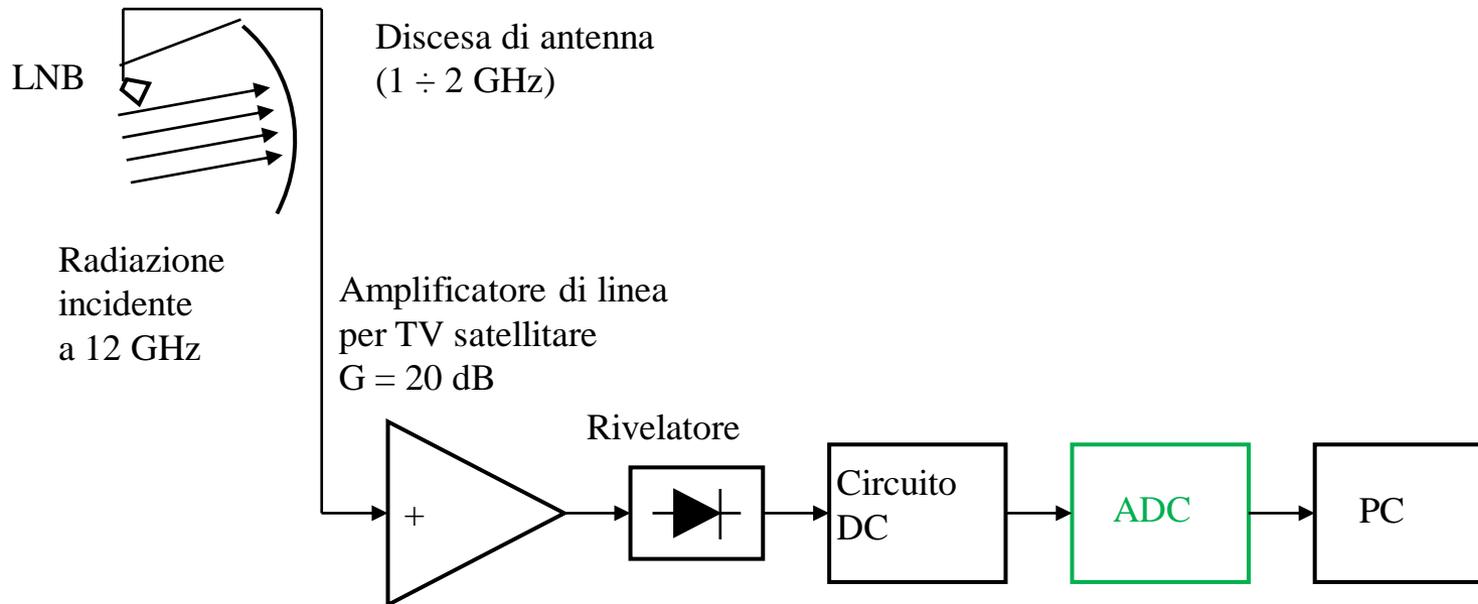


# Schema della sezione D.C.



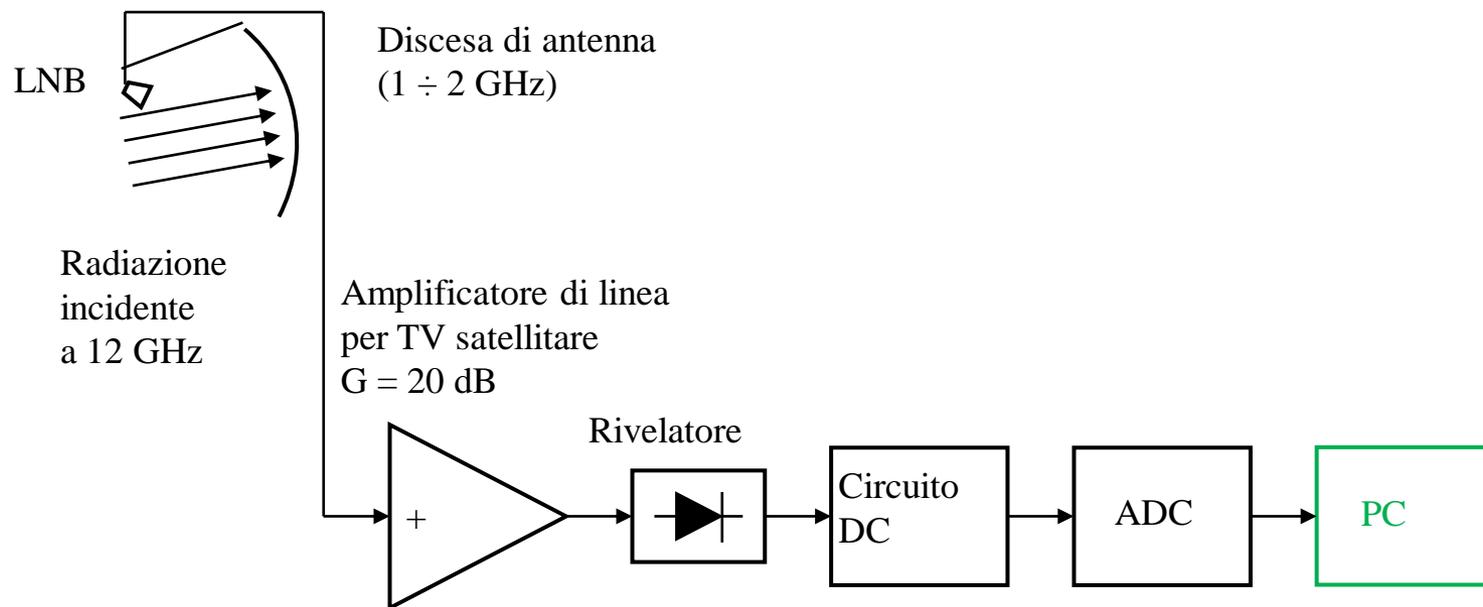
# Descrizione generale del sistema - sezione D.C.

Integratore e circuito di off-set effettuano anche una amplificazione del segnale prima di inviarlo al convertitore analogico-digitale.



# Visualizzazione

Il segnale digitalizzato viene visualizzato su PC.



# Utilizzazione come radiotelescopio

Il ricevitore può anche essere utilizzato come radiotelescopio dimostrativo. In questo caso, considerando il Cielo Freddo ad una temperatura di circa 40 °K, risulta una minima temperatura detectabile:

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_R + T_{\text{CieloFreddo}}}{\sqrt{\Delta\nu \cdot \tau}} = \frac{35,4 + 40}{\sqrt{10^9 \cdot 10^{-2}}} \cong 0,02 \text{ °K}$$

A causa delle ridotte dimensioni del paraboloide utilizzato, per mezzo di questo sistema sono osservabili soltanto le radiosorgenti celesti più grandi, ovvero Sole, Luna e Via Lattea, che comunque non vengono risolte. Inoltre, poiché il rivelatore, al variare della potenza della radiazione misurata, non funziona sempre nella zona quadratica, non è possibile la misurazione puntuale numerica delle temperature in gioco.