

# LE ANTENNE

## INTRODUZIONE

Le antenne sono dispositivi impiegati nella trasmissione e nella ricezione di onde elettromagnetiche. La forma di un'antenna è molto variabile e dipende dal tipo di impiego: radiotelegrafia, radiodiffusione, ripetitori a microonde, radiotelescopi, radar.

In generale le dimensioni di un'antenna dipendono dalla frequenza alla quale è impiegata: le antenne usate per frequenze basse possono avere lunghezze notevoli, 1000 m. e più; quelle usate per frequenze molto alte al contrario sono più piccole. Le antenne vengono divise in tre categorie: le antenne con conduttore lineare, le antenne a guida d'onda e le antenne di tipo ottico. Il tipo più semplice è costituito dall'antenna a dipolo elettrico (costituito da uno o più conduttori rettilinei di piccola lunghezza) o magnetico (costituito da una piccola bobina).

Qualora la lunghezza del dipolo sia uguale a metà della lunghezza d'onda per la quale viene impiegato, si parla di antenna a risonanza, molto usata per le sue caratteristiche di alta efficienza e direzionalità. Vengono costruiti dipoli semplici e ripiegati soprattutto nel campo delle onde ultracorte .

Nel caso di frequenze ancora più elevate, come quelle impiegate per le trasmissioni televisive( VHF o "very high frequency" da 30 a 300 MHz e UHF o " ultra high frequency" da 300 a3000 MHz), devono essere a un'estesa banda di frequenza , e questo si ottiene con l'impiego di conduttori aventi un elevato diametro rispetto alla lunghezza dell'antenna ; un effetto di questo tipo si può ottenere mediante la costruzione di gabbie di conduttori sottili, di forma conica od a ventaglio.

Nel caso in cui le aree da coprire nella trasmissione siano ristrette nello spazio, si ricorre con vantaggio ad antenne direzionali, le quali presentano il vantaggio , oltre a quello di coprire una distanza maggiore con la stessa potenza , di ridurre notevolmente le interferenze.

Nel caso in cui l'aria da coprire sia particolarmente vasta , si ricorre a reti di antenne direzionali , sia per la trasmissione sia per la ricezione.

Un altro tipo di antenne di largo impiego è costituito dalle antenne Yagi, formate da una rete di conduttori lineari , paralleli e complanari , di cui uno solo è l'elemento attivo, costituito da un dipolo ripiegato , e gli altri tutti passivi ,funzionano in parte come riflettori ed in parte come direttori , per l'aumento della direzionalità: si tratta del tipo di antenne maggiormente diffuso per la ricezione dei programmi televisivi. In alcuni casi vengono richieste antenne ad altissima direttività come per l'inseguimento di satelliti artificiali nella loro orbita: questo si ottiene con coppie di antenne fra loro distanziate( fino a 100 - 150m.), in modo che l'angolo con cui il segnale emesso dal satellite raggiunge le antenne determina uno sfasamento fra i due segnali, inversamente proporzionale alla correttezza del puntamento.

## ANTENNE A GUIDA D'ONDA

Sono usate nel campo delle microonde ( lunghezze di onda centimetriche ) in associazione alle guide d'onda. Ve ne sono del tipo a tromba, in cui la guida d'onda viene fatta terminare similmente ad un megafono aperto nella direzione di propagazione, ed a feritoia.

Il principio su cui si basano quest'ultima antenna è il seguente: una cavità metallica completamente chiusa, che contenga un generatore di radiofrequenza, in una parte

della quale venga praticata un'apertura, diventa una sorgente di onde elettromagnetiche per lo spazio circostante, analogamente ad un dipolo. In un'antenna a feritoia la lunghezza dell'apertura è pari a mezza lunghezza d'onda, mentre la sua lunghezza è notevolmente più piccola.

*Per aumentare la direttività, in corrispondenza dell'apertura, può essere aggiunta una tromba.*

## ANTENNE DI TIPO OTTICO

L'ottica ordinaria può essere estesa al campo delle radiazioni elettromagnetiche, in particolare al campo delle microonde: così vengono realizzate antenne a riflettore ed antenne con lenti.

*Nel primo tipo di antenne ottiche viene impiegata un'opportuna sorgente di radiazione (un dipolo, una tromba od una feritoia), posta nel fuoco di una struttura riflettente di forma opportuna (per es. a paraboloide) realizzata con materiale ad alta conduttività elettrica; nel secondo tipo invece, impiegabile con vantaggio alle lunghezze d'onda più corte, con strutture paragonabili alle lenti ottiche, si può per esempio far convergere un fascio parallelo nel fuoco della lente in ricezione, e viceversa in trasmissione si può convertire un fascio di raggi divergenti dalla sorgente in fascio parallelo.*

*Per piccole lenti si può impiegare strutture costituite dai materiali dielettrici omogenei, come il polistirolo.*

*Per lenti di grandi dimensioni invece vengono impiegati sistemi più complicati con guide d'onda.*

*Le antenne di tipo ottico hanno fondamentale importanza nelle comunicazioni di segnali ad altissime frequenze, a grandi distanze in quanto le onde ultracorte e le microonde (con frequenza superiore ai 30MHz), non venendo riflesse dalla ionosfera, hanno traiettoria rettilinea e la portata, limitata dalla curvatura terrestre, è quella ottica; in questi casi allora vengono impiegati ripetitori intermedi, costituiti da un complesso di una antenna ricevente, da amplificatori di antenna e da antenne trasmettenti, sempre dello stesso tipo ottico.*

Molti degli impianti su lunghissime distanze sono oggi sostituiti con vantaggio da ripetitori o riflettori installati su satelliti artificiali.

## DIPOLO MARCONIANO

Il dipolo marconiano è costituito da un conduttore rettilineo verticale, di altezza  $h$ , con l'estremo inferiore messo a terra (attraverso il generatore a radiofrequenza).

*Assimilato ad una linea aperta senza perdite, esso presenta, nel generico punto a distanza  $d$  dall'estremo superiore, un'impedenza d'ingresso puramente reattiva.*

*Nel punto  $d=h$ , posto a terra, l'impedenza deve essere nulla (nodo di tensione e ventre di corrente) affinché nell'antenna si possa stabilire un regime stazionario di risonanza serie.*

*Se l'antenna è in risonanza con la frequenza fondamentale  $f_0$ , si dice che essa oscilla in quarto d'onda. Il corrispondente andamento delle ampiezze di tensione e di corrente viene rappresentato dal dipolo marconiano e da quello hertziano.*

*Quando invece l'antenna oscilla sulle altre frequenze proprie, multiple dispari di  $f_0$ , si dice che l'antenna oscilla in armonica. Il sistema considerato è un circuito oscillante "aperto", nel senso che, a differenza di quanto accade in un circuito oscillante "chiuso" a costanti concentrate:*

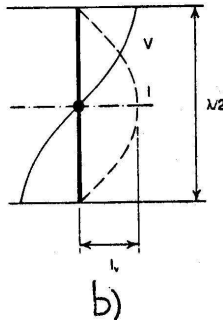
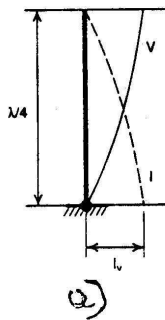
- la corrente in un certo istante non ha lo stesso valore in tutti i punti del circuito ma varia da punto a punto;
- la condizione di risonanza non è unica, ma si hanno infinite condizioni di risonanza (funzionamento in armonica);
- il campo elettromagnetico non è confinato prevalentemente all'interno del circuito, ma si irradia in tutto il dielettrico circostante.

Da quest'ultima caratteristica deriva che in un'antenna, anche nell'ipotesi di perdite assolutamente nulle, per mantenere un regime oscillatorio stazionario, il generatore

deve fornire una certa potenza attiva, per sopperire a quelle irradiata nello spazio. Pertanto nel nodo di tensione alla base dell'antenna la tensione non è nulla, ma presenta un minimo diverso da zero.

Detta  $P_t$  la potenza irradiata e  $I_v$  il valore efficace della corrente nel punto in cui è inserito il generatore, si può definire la resistenza di radiazione dell'antenna, in base alla relazione:

$$R_i = P_t / I_v^2$$

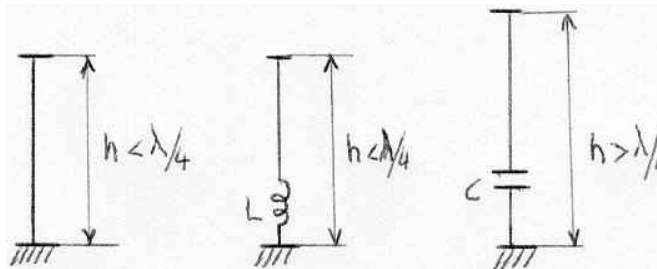


a) SCHEMA DIPOLO MARCONIANO

b) SCHEMA DIPOLO HERTZIANO

Per il dipolo in quarto d'onda, il valore di  $R_i$ , valutato alla base dell'antenna, risulta:

$$R_i (\lambda/4) = 36,5 \Omega$$



DIPOLI MARCONIANI "CARICATI"

Si può far oscillare un dipolo marconiano anche su una frequenza per cui sia  $h \neq \lambda / 4$  (o multiplo dispari di  $\lambda / 4$ ), a patto di "caricare" opportunamente l'antenna con capacità e induttanze concentrate.

Così per esempio, se  $h < \lambda / 4$ , si può "allungare" l'antenna realizzando sulla sua sommità una capacità concentrata  $C$  verso terra (mediante un complesso di conduttori orizzontali), oppure inserendo alla sua base un'induttanza  $L$ .

## DIPOLO HERTZIANO

Se si sostituisce alla terra del dipolo marconiano la seconda metà del radiatore, cioè l'immagine elettrica dell'antenna verticale in  $\lambda / 4$ , si ottiene il così detto dipolo hertziano, costituito essenzialmente da un filo lungo  $\lambda / 2$  con gli estremi isolati, alimentato al centro in corrispondenza del ventre di corrente.

Al ventre di fa riscontro un nodo di tensione dove, anche nell'ipotesi di perdite assolutamente nulle, la tensione presenta un minimo diverso da 0, a causa della potenza irradiata dall'antenna.

La corrispondente resistenza di radiazione avrà un valore di quello presente alla base del dipolo marconiano, poiché a parità di intensità della corrente nel ventre, la potenza irradiata da un dipolo in  $\lambda / 2$  è doppia di quella del dipolo in  $\lambda / 4$  si ha pertanto:

$$R_i (\lambda / 2) = 73 \Omega$$

Va tenuto presente che il dipolo hertziano può essere disposto verticalmente o anche orizzontalmente: nei due casi differisce soltanto la polarizzazione del campo elettromagnetico, cioè l'orientamento della coppia dei vettori  $E, H$  nei vari punti dello spazio circostante.

I valori della resistenza di radiazione sono teorici: in pratica si hanno valori minori a seconda che il dipolo sia realizzato con conduttori filiformi (ordine di  $32\ \Omega$  per il dipolo marconiano e di  $64\ \Omega$  per quello hertziano) o con conduttori tubolari ( $28 \div 30\ \Omega$  per il dipolo marconiano,  $56 \div 60\ \Omega$  per quello hertziano).

Osserviamo infine che, per ottenere una corretta risonanza, i dipoli vengono realizzati con una lunghezza fisica leggermente inferiore a quella teorica ( $\frac{1}{4}$  o  $\frac{1}{2}$ ), in modo da tenere conto degli effetti capacitivi delle "terminazioni d'orlo" (cioè in corrispondenza degli estremi liberi dei dipoli). In pratica si tiene conto di ciò assumendo un valore ridotto della lunghezza d'onda:

$$\dot{e} = Kc/f$$

secondo un coefficiente  $K = 0,95 \div 0,96$  detto coefficiente di velocità.

## GUADAGNO DI UN'ANTENNA

La resistenza di radiazione consente di valutare il rendimento dell'antenna, cioè il rapporto fra la potenza irradiata  $P_t$  e la potenza fornita dall'antenna  $P_a$  in base alla relazione:

$$\eta = P_t/P_a$$

Per una potenza irradiata  $P_t$ , l'intensità del campo elettromagnetico nei vari punti dello spazio circostante dipende, oltre che alla distanza  $r$ , anche dalla direzione del punto considerato rispetto all'antenna.

$$G = P_{t0}/P_t$$

È il guadagno dell'antenna inteso come il rapporto tra la potenza  $P_{t0}$  che dovrebbe irradiare un'antenna ideale "isotropa" e la potenza  $P_t$  irradiata dall'antenna considerata, per ottenere la stessa intensità di campo elettrico in un determinato punto nella direzione di massima irradiazione. Il prodotto della resistenza di radiazione di un'antenna per il suo guadagno determina la resistenza di radiazione efficace:

$$R_{ie} = R_i * G$$

## LUNGHEZZA EFFICACE E AREA EQUIVALENTE

Per un'antenna dipolare ricevente la lunghezza efficace  $l_e$  (o altezza efficace  $h_e$ , se verticale) rappresenta la lunghezza che essa avrebbe, a parità di segnale ricevuto nella direzione di massima ricezione, se la forza elettromotrice in essa indotta fosse distribuita

Uniformemente lungo tutta l'antenna, sicchè possa scriversi:

$$V_m = E_m * l_e$$

In cui  $E_m$  è l'intensità del campo elettrico inducente nella direzione di massima ricezione, e  $V_m$  è la forza elettromotrice indotta nell'antenna orientata secondo tale direzione. Che per i semplici dipoli marconiani e hertziani si riduce a:

$$l_e = \lambda / \pi$$

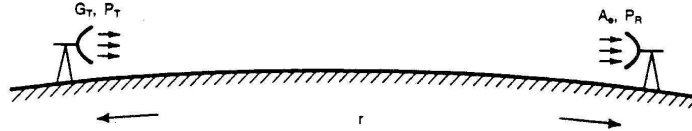
Altro parametro caratteristico delle antenne riceventi è l'area equivalente, rapporto fra la potenza disponibile  $P_u$  all'uscita dell'antenna (orientata nella direzione di massima ricezione) e la densità di potenza  $S$  dell'onda incidente.

Vale la seguente relazione, che lega l'area efficace al guadagno dell'antenna:

$$A_e = P_u / S = \lambda / 4 \pi * G$$

## FORMULA FONDAMENTALE DI TRASMISSIONE

Con riferimento ad un radiocollegamento direttivo a microonde (ponte radio), tra un trasmettitore ed un ricevitore posto a distanza  $r$  nella direzione di massima radiazione, sia  $P_t$  la potenza trasmessa,  $S$  la densità di potenza entrante nell'antenna ricevente,  $G_t$  il guadagno dell'antenna trasmittente ed  $A_e$  l'area equivalente dell'antenna ricevente.



Per la definizione di guadagno, la densità di potenza  $S$  sarà  $G_t$  volte maggiore della densità di potenza  $S_0$  che transiterebbe nell'antenna ricevente se si usasse in trasmissione un'antenna isotropa.

$$S_0 = P_t / 4 \pi r^2 \quad \text{si ottiene:} \quad S = G_t * P_t / 4 \pi r^2$$

La potenza disponibile all'uscita dell'antenna ricevente (fornita al carico in condizioni di adattamento) è data dall'espressione:

$$P_r = A_e * S = A_e * G_t * P_t / 4 \pi r^2$$

Dalla quale si deduce l'attenuazione disponibile del radiocollegamento:

$$P_t / P_r = 4 \pi r^2 / A_e * G_t$$

*Che rappresenta la formula fondamentale della trasmissione di energia elettromagnetica nello spazio libero.*

*Nota  $P_t$ , il problema si riporta alla determinazione dei valori da attribuire ad  $A_e$  e a  $G_t$ .*

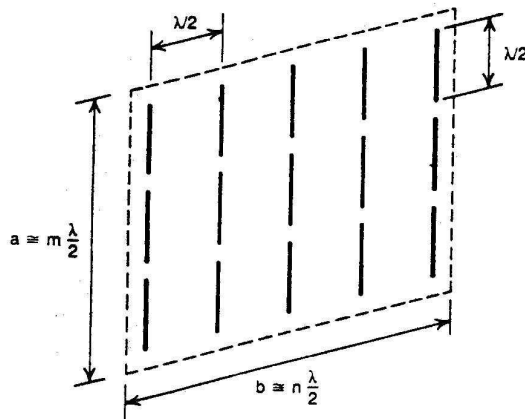
*Se il collegamento è effettuato con microonde, si impiegano antenne direttive di tipo superficiale (per es. a paraboloidi), per le quali l'area equivalente dell'antenna ricevente  $A_e$  è deducibile come percentuale nell'area geometrica dell'antenna.*

*Per quanto riguarda il valore da attribuire al guadagno  $G_t$  dell'antenna trasmittente, è sufficiente dividere la sua area equivalente (uguale a quella dell'antenna ricevente, se si impiegano due antenne uguali) per l'area equivalente  $A_{e0}$  dell'antenna isotropa, per  $G=1$ :*

$$A_{e0} = A_e / G = \lambda^2 / 4 \pi$$

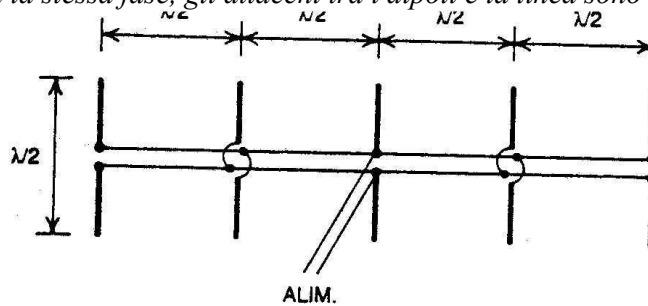
## ANTENNE UNIDIREZIONALI A CORTINA DI DIPOLI

Un'antenna a cortina di dipoli è costituita da più dipoli in mezza onda complanari e disposti parallelamente fra loro, secondo un reticolo di  $m$  righe ed  $n$  colonne, per  $m=3$ ,  $n=5$ .



I dipoli vengono alimentati in modo che le correnti che li percorrono siano fra loro in fase e della stessa ampiezza.

La fase della tensione lungo la linea aperta si inverte ogni  $\lambda/2$  e quindi, per alimentare i dipoli con la stessa intensità e con la stessa fase, gli attacchi tra i dipoli e la linea sono invertiti ogni  $\lambda/2$ .



La linea è alimentata al centro, per ridurre al minimo la distanza tra il punto di alimentazione e l'ultimo dipolo. Se la cortina è costituita da più file di dipoli, ogni fila viene normalmente alimentata da una linea separata.

Il campo elettrico in un punto ad una certa distanza dalla cortina di dipoli è dovuto dalla composizione dei campi elettrici irradiati dai singoli dipoli della cortina.

Guardando la cortina da sopra (nel nostro esempio 5 colonne di dipoli paralleli), si ha un diagramma di radiazione (=diagramma polare del vettore  $E$  nelle varie direzioni del piano considerato), con due lobi principali simmetrici nelle due direzioni perpendicolari al piano della cortina.

Valgono al riguardo le seguenti formule approssimate per le aperture dei lobi principali orizzontale e verticale ( $\varphi_0, V_0$ ), in funzione del numero di dipoli nei rispettivi piani ( $m, n$ ):

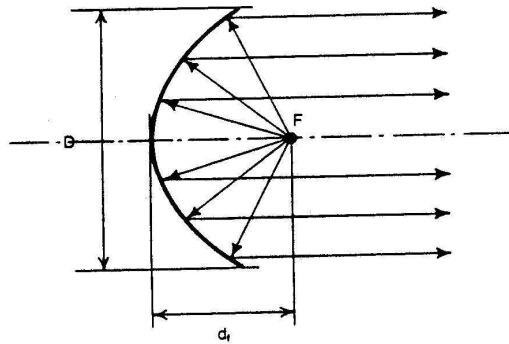
$$\varphi_0 = (120/n)^0 ; V_0 = (120/m)^0$$

Usata come ricevente, l'antenna a cortina presenta pertanto un'area equivalente.

## ANTENNE A RIFLETTORE PARABOLICO

La struttura tipica di un'antenna a riflettore parabolico comprende un'antenna primaria (illuminatore) posta nel fuoco di una struttura riflettente conformata a paraboloido.

I parametri geometrici che definiscono il paraboloido sono il diametro  $D$  e la distanza focale  $df$ .



Il diametro dipende dal guadagno che si vuole ottenere alla frequenza di lavoro. Tanto più grande è il guadagno richiesto, tanto maggiore si deve scegliere  $D$ , dato che, per tutte le antenne dello stesso tipo, l'EFFICIENZA è pressochè costante ( $0,5 \div 0,6$ ). Per efficienza di un'antenna superficiale si intende il rapporto fra l'area equivalente  $A_e$  e l'area geometrica  $A_c$  corrispondente alla superficie di chiusura dell'antenna:

$$\eta_a = A_e / A_c$$

Nel caso di un'antenna a paraboloidi di diametro  $D$ , l'area geometrica è data da  $\pi D^2/4$ , per cui risulta:

$$A_e = \eta_a * (\pi D^2/4)$$

L'apertura del fascio di irradiazione è tanto più piccola quanto maggiore è il diametro del paraboloidi rispetto alla lunghezza d'onda. Si ha approssimativamente:

$$\varphi_0 \approx (70 * \lambda / D)^0$$

Per quanto riguarda la distanza focale, la scelta va fatta in base alle caratteristiche direzionali dell'illuminatore. Fissato  $D$ , per una data apertura del fascio primario dell'illuminatore, allontanando troppo quest'ultimo dal riflettore, cioè adottando distanze focali  $d_f$  grandi rispetto al diametro  $D$ , una parte notevole dell'energia irradiata dall'illuminatore non viene intercettata dal paraboloidi: si ha perdita di guadagno per spillover. Avvicinando troppo l'illuminatore al riflettore, cioè adottando distanze focali piccole rispetto a  $D$ , solo la parte centrale del riflettore viene colpita da un campo intenso, mentre la parte periferica rimane praticamente inutilizzata: si ha perdita di guadagno per riduzione dell'efficienza dell'antenna.

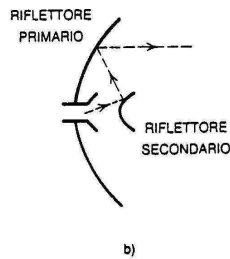
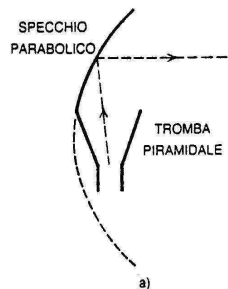
Esiste pertanto un rapporto ottimale  $d_f/D$ , si può avere un sensibile SPILLOVER per la presenza di lobi secondari nel diagramma di radiazione dell'illuminatore. Si può ridurre questo effetto mediante un "colletto schermante" cilindrico, disposto lungo il contorno della bocca del paraboloidi, o incorporato nel radome (radar antenna dome cover) dell'antenna, cioè nei dispositivi di protezione dell'antenna da fattori ambientali (vento, pioggia, ghiaccio, uccelli, ecc.)

Come illuminatore le antenne a paraboloidi usano comunemente un dipolo in mezza onda (schermato con un disco metallico posto a distanza di  $\lambda/4$  dal dipolo, dalla parte opposta del riflettore) fino a frequenze dell'ordine di  $2 \div 3$  GHz, poiché fino a questa frequenza è possibile impiegare, come linee di alimentazione delle antenne (feeders), i cavi coassiali. Per frequenze superiori è preferibile usare come feeders le guide d'onda e come illuminatore un'ANTENNA A TROMBA.

L'antenna a tromba ha una larghezza di banda molto maggiore del dipolo in mezza onda; inoltre ha il vantaggio di essere "autoschermante", perché l'irradiazione avviene soltanto dalla parte in cui si trova il riflettore, verso il quale viene orientata la bocca dell'illuminatore.

Nell'antenna a paraboloide di rivoluzione esiste il problema dell'ombra dell'illuminatore, che intercetta inevitabilmente una parte dell'energia irradiata dal riflettore. Inoltre, nel caso di illuminatore a tromba, una parte dell'energia intercettata rientra nella tromba, alterando con ciò la sua impedenza d'ingresso (cioè l'impedenza di chiusura del feeders a guida d'onda). Questi inconvenienti non sono presenti in particolari tipi di antenne superficiali, derivate da quella a paraboloide, quali l'antenna a TROMBA RIFLETTORE e l'antenna CASSEGRAIN.

La prima (detta anche horn-reflector o antenna a SPICCHIO PARABOLICO ) è del tipo "off set" (fuori asse ), perché utilizza una porzione del riflettore parabolico non contenente il vertice della parabola: in tal modo si evita che l'illuminatore faccia "ombra" alle onde riflesse.



a) TROMBA - RIFLETTORE

b) CASSEGRAIN

L'illuminatore è un'antenna a tromba piramidale, che viene prolungata fino ad appoggiarsi al contorno dello spicchio parabolico, lasciando aperta solo la parte da cui deve uscire l'energia riflessa (parte che, per ragioni pratiche, viene chiusa da una lastra di materiale isolante, trasparente alle onde elettromagnetiche).

L'antenna Cassegrain è costituita da un'illuminatore a tromba posto nel vertice di un paraboloide (riflettore primario) e da un riflettore secondario a iperboloide: quest'ultimo riflettendo le onde elettromagnetiche provenienti dall'illuminatore a tromba, illumina uniformemente la superficie riflettente del paraboloide, aumentando in tal modo l'efficienza dell'antenna, rispetto all'antenna a semplice riflettore parabolico.

Inoltre con questa soluzione si riducono i problemi relativi allo spillover (potenza irradiata dall'illuminatore al di fuori del riflettore).