



UNION SCHWEIZERISCHER KURZWELLEN-AMATEURE
UNION DES AMATEURS SUISSES D'ONDES COURTES
UNIONE RADIOAMATORI DI ONDE CORTE SVIZZERI
UNION OF SWISS SHORT WAVE AMATEURS

Member of the International Amateur Radio Union

Formule e spiegazioni

1. Formula per una sfera

La densità di potenza S è data dalla formula:

$$S = E \cdot H \quad (\text{I})$$

dove: S = densità di potenza [W/m^2]

E = valore efficace dell'intensità di campo elettrico [V/m]

H = valore efficace dell'intensità di campo magnetico [A/m]

La relazione fra E e H è data da:

$$Z_0 = \frac{E}{H} \quad (\text{II})$$

dove: Z_0 = resistenza dell'onda di campo nello spazio libero [Ω]

$$Z_0 = 120 \cdot \pi = 377 \Omega$$

La densità di potenza S irradiata da una sfera di potenza P alla distanza r è data da:

$$S = \frac{P}{A} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{III})$$

dove: P = potenza irradiata [W]

A = superficie della sfera [m^2]

r = raggio della sfera [m]

Con le 3 formule riportate più sopra, la potenza può essere espressa come segue:

$$P = S \cdot A = E \cdot H \cdot A = \frac{E^2}{Z_0} \cdot A = \frac{E^2}{120 \cdot \pi} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{E^2 \cdot r^2}{30} \quad (\text{IV})$$

L'intensità di campo diventa:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P}}{r} \quad (\text{V})$$

Poiché si suppone che l'antenna trasmittente sia un'antenna isotropa (puntiforme), il raggio r della superficie della sfera è uguale alla distanza d dall'antenna trasmittente fino al luogo in cui si deve determinare l'intensità di campo.

2. Elaborazione delle formule

Quello che è determinante per rispettare i valori limite per le stazioni di radioamatore è il valore medio dell'intensità di campo (valore di riscaldamento) durante intervalli di 6 minuti, nei luoghi dove possono soggiornare delle persone (LSBD). Questa intensità di campo viene calcolata in base alla potenza media d'emissione del trasmettitore, meno le perdite di cavi e altro, al guadagno dell'antenna e alla distanza. Inoltre, in caso di necessità, si può tenere conto anche del diagramma di irradiazione verticale dell'antenna e dell'attenuazione dei solai di cemento armato e delle pareti. Per motivi di sicurezza, l'intensità di campo calcolata viene moltiplicata per un fattore di riflessione al suolo di 1,6.

I metodi di calcolo si basano sullo studio "Misure e calcoli delle immissioni di campi elettromagnetici nel caso di impianti radioamatoriali" (progetto EFAM), elaborato con l'OFEFP e con l'assistenza di Swisscom (CT830-4 dell'8.6.1998).

Determinazione della potenza media d'emissione del trasmettitore P_m

La potenza media d'emissione del trasmettitore per intervalli di 6 minuti dipende dalla potenza d'emissione del trasmettitore in servizio continuo e dal fattore di utilizzazione (duty factor) determinato dal tipo di modulazione e dal genere di attività.

$$P_m = k \cdot P = AF \cdot MF \cdot P \quad (1)$$

dove:

- P_m = potenza media d'emissione del trasmettitore in watt
- k = fattore d'utilizzazione (duty factor)
- P = potenza d'emissione del trasmettitore in watt
- AF = fattore d'attività
- MF = fattore di modulazione

Con l'obiettivo di una standardizzazione, ci si è basati sulla pratica della Federal Communications Commission (FCC) americana, che utilizza un intervallo di 6 minuti con 3 minuti di trasmissione e 3 di ricezione (50%), il che equivale a un fattore d'attività di 0,5. Si è inoltre tenuto conto del fatto che la potenza media d'emissione del trasmettitore assume i seguenti valori: nel caso della modulazione di banda laterale unica (BLU), 20% ($MF=0,2$); nel caso della telegrafia (CW), 40% ($MF=0,4$); e, nel caso della modulazione di frequenza (FM) o del traffico telex (RTTY), 100% ($MF=1$) della potenza massima. La potenza media d'emissione di un trasmettitore da 100 watt è di 10 watt in BLU, di 20 watt in telegrafia e di 50 watt in FM / RTTY.

Determinazione delle perdite fra l'uscita del trasmettitore e l'antenna

Le perdite dei cavi si calcolano moltiplicando l'attenuazione specifica (dB/m) del(i) cavo(i) utilizzato(i) per la sua(loro) lunghezza. Si devono poi aggiungere le attenuazioni dei connettori (0,1 dB per connettore) e degli apparecchi inseriti nel circuito (wattmetro, commutatori, filtri, accordatori d'antenna) per la frequenza utilizzata. L'attenuazione si calcola come segue:

$$a = a_1 + a_2 \quad (2)$$

dove:

- a = somma delle attenuazioni in dB
- a_1 = attenuazione dei cavi in dB
- a_2 = altra attenuazione (connettori ecc.) in dB

Il fattore d'attenuazione in valore assoluto si calcola a partire dall'attenuazione totale in dB come segue:

$$A = 10 \left(\frac{-a}{10} \right) \quad (3)$$

dove:

A = fattore d'attenuazione

Determinazione del guadagno dell'antenna

Il guadagno dell'antenna in dB_i riferito a un'antenna puntiforme è determinante per il calcolo della potenza isotropa irradiata equivalente (EIRP). Questo guadagno è maggiore di 2,15 dB rispetto a quello di un dipolo (dB_d). In mancanza di dati da parte del costruttore, si è utilizzato un guadagno di 2,15 dB_i per dipoli a semionda, antenne verticali e loop magnetici, di 6 dB_i per Quad a 2 elementi e di 6,5 dB_i per Yagi a 3 elementi. Tali valori si riferiscono all'asse di irradiazione principale dell'antenna. Per le antenne fortemente direttive, si può tenere conto dell'attenuazione dell'angolo d'irradiazione verticale dell'antenna. Il guadagno dell'antenna si calcola nel modo seguente:

$$g = g_1 - g_2 \quad (4)$$

dove:

g = guadagno totale dell'antenna in dB

g_1 = guadagno dell'antenna in dB_i

g_2 = attenuazione dell'angolo d'irradiazione verticale in dB

Il fattore di guadagno dell'antenna espresso in cifre assolute si calcola a partire dal guadagno dell'antenna in dB come segue:

$$G = 10 \left(\frac{g}{10} \right) \quad (5)$$

dove:

G = fattore di guadagno dell'antenna

Determinazione della potenza di trasmissione determinante P_s

La potenza media d'emissione del trasmettitore P_m moltiplicata per il fattore di perdita A e per il fattore di guadagno G dell'antenna dà quale risultato la potenza di trasmissione determinante (EIRP) nell'asse d'irradiazione principale:

$$P_s = P_m \cdot A \cdot G \quad (6)$$

dove:

P_s = potenza di trasmissione determinante (EIRP) in watt

Nell'Ordinanza RNI, la potenza di trasmissione determinante viene riferita al dipolo esclusivamente come ERP. Considerato che un dipolo ha un guadagno dell'antenna di 2,15 dB, che corrisponde a un fattore di guadagno dell'antenna di 1,64 paragonato a un'antenna isotropa, la potenza di trasmissione determinante (ERP) risultante viene ridotta di questo fattore.

$$P'_S = \frac{P_S}{1.64} \quad (7)$$

dove:

P'_S = potenza di trasmissione determinante (ERP) in watt

Determinazione dell'intensità di campo determinante E' nell'LSBD

Con la formula di campo lontano (formula per la sfera), si può calcolare, a partire dalla potenza di trasmissione determinante, l'intensità di campo media E nel campo lontano alla distanza d dall'antenna (nell'LSBD = spazio/locale di soggiorno di breve durata). Fatta eccezione per le antenne filari lunghe e per i dipoli in filo per bande basse a onde corte, si è scelto come punto di riferimento per la distanza il punto d'alimentazione dell'antenna. Per le antenne filari lunghe e i dipoli in filo, si è considerata come punto di riferimento la parte dell'antenna più vicina all'LSBD. In certi casi, si può tenere conto anche dell'attenuazione dello stabile, qualora le persone abbiano la buona idea di tenersi soltanto dietro i muri. Il fattore d'attenuazione dello stabile espresso in cifre assolute si calcola a partire dall'attenuazione dello stabile in dB come segue:

$$A_G = 10^{\left(\frac{-a_G}{10}\right)} \quad (8)$$

dove:

A_G = fattore d'attenuazione dello stabile

a_G = attenuazione dello stabile in dB

L'intensità di campo media alla distanza d dell'LSBD dall'antenna si calcola secondo la formula riportata qui di seguito.

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_S \cdot A_G}}{d} \quad (9)$$

dove:

E = intensità di campo media in volt per metro

d = distanza dell'LSBD dall'antenna in metri

In seguito a misurazioni, si è potuto determinare che l'intensità di campo rilevata nel campo prossimo era a volte leggermente maggiore rispetto a quella calcolata. Basandosi sulla pratica americana (della FCC), la formula è stata modificata con l'aggiunta del fattore di riflessione al suolo $k_r = 1,6$. I valori così misurati sono risultati allora, senza eccezioni, al di sotto dei valori calcolati applicando la formula modificata (fanno eccezione i loop magnetici). L'intensità di campo determinante E' nell'LSBD si calcola ora in base alla seguente formula:

$$E' = k_r \cdot E = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P_S \cdot A_G}}{d} \quad (10)$$

dove:

E' = intensità di campo determinante nell'LSBD in volt per metro

k_r = fattore di riflessione al suolo ($k_r = 1,6$)

Una variazione di potenza per un fattore di 10 aumenta o riduce l'intensità di campo per un fattore di $\sqrt{10}$, quindi di 3,2. Anche l'intensità di campo di un'onda portante continua (utilizzata normalmente per le misure) è 3,2 volte più forte dell'intensità di campo generata durante le trasmissioni radio in BLU (potenza media 10%).

Determinazione della distanza di sicurezza d_s

La distanza di sicurezza viene calcolata risolvendo la formula (10) dopo d e sostituendo E' con il valore limite d'immissione secondo ORNI per la frequenza utilizzata.

$$d_s = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P_s \cdot A_G}}{E_{VLI}} \quad (11)$$

dove:

d_s = distanza di sicurezza in metri

E_{VLI} = valore limite delle immissioni secondo ORNI per l'intensità di campo in volt per metro

3. Esempio di calcolo per un ipotetico impianto trasmittente con una frequenza di 7 MHz

Dati: un trasmettitore con potenza d'uscita di 100 watt trasmette in CW e BLU (fattore di modulazione MF = 0,4 per il CW). Fra trasmettitore e antenna vi sono 15 m di cavo coassiale RG213 e 3 m di cavo coassiale RG58. Un accordatore d'antenna e 4 connettori determinano un'ulteriore attenuazione. L'antenna utilizzata è una Fritzel FB34. La FB34 è un'antenna a fascio a 3 elementi e 4 bande. A 7 MHz, l'antenna si comporta come un dipolo con un guadagno $g_1 = 2,15 \text{ dB}_i$. La distanza d fra il limite della proprietà e il punto d'alimentazione dell'antenna (Yagi) è di 12,5 m.

Potenza media d'emissione del trasmettitore: $P_m = AF \cdot MF \cdot P = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 100 = 20,0 \text{ W}$

Attenuazione di 15 m di cavo RG213 (attenuazione di 1,4 dB per 100 m a 7 MHz) e di 3 m di cavo RG58 (3,9 dB per 100 m a 7 MHz): $a_1 = 15 \cdot \frac{1,4}{100} + 3 \cdot \frac{3,9}{100} = 0,33 \text{ dB}$

Attenuazione dell'accordatore d'antenna (0,2 dB) e di 4 connettori (0,4 dB): $a_2 = 0,6 \text{ dB}$

Somma delle attenuazioni: $a = a_1 + a_2 = 0,33 + 0,6 = 0,93 \text{ dB}$

Fattore d'attenuazioni: $A = 10^{\left(\frac{-a}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{-0,93}{10}\right)} = 0,807$

Guadagno dell'antenna Fritzel FB34 a 7 MHz: $g_1 = 2,15 \text{ dB}_i$

Attenuazione dell'angolo d'irradiazione verticale: non presa in considerazione: $g_2 = 0 \text{ dB}$

Guadagno totale dell'antenna: $g = g_1 - g_2 = 2,15 - 0 = 2,15 \text{ dB}$

Fattore di guadagno dell'antenna: $G = 10^{\left(\frac{g}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{2,15}{10}\right)} = 1,641$

Potenza di trasmissione determinante (EIRP): $P_s = P_m \cdot A \cdot G = 20 \cdot 0,807 \cdot 1,641 = 26,49 \text{ W}$

Potenza di trasmissione determinante (ERP): $P'_s = P_s / 1,64 = 16,15 \text{ W}$

Attenuazione dello stabile: non presa in considerazione: $a_G = 0 \text{ dB}$

$$\text{Fattore d'attenuazione dello stabile: } A_G = 10^{\left(\frac{-a_G}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{-0}{10}\right)} = 1,0$$

L'intensità di campo media E con una distanza LSBD-antenna di 12,5 m è pari a:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_s \cdot A_G}}{d} = \frac{\sqrt{30 \cdot 26,49 \cdot 1,0}}{12,5} = 2,26 \text{ V/m}$$

L'intensità di campo determinante E' nell'LSBD con una distanza dell'LSBD dall'antenna di 12,5 m è pari a:

$$E' = k_r \cdot E = 1,6 \cdot 2,26 = 3,61 \text{ V/m}$$

Con un valore limite d'immissione (VLI) di 32,4 V/m (per la frequenza di 7 MHz), la distanza di sicurezza è pari a:

$$d_S = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P_s \cdot A_G}}{E_{VLI}} = \frac{1,6 \cdot \sqrt{30 \cdot 26,49 \cdot 1,0}}{32,4} = 1,39 \text{ m}$$