

**Appunti dal corso di  
Sistemi di Telecomunicazione A. A. 2008/09  
Prof. Mario Fossi**

**3 - RUMORE ESTERNO**

**Cenno sull'ITU**

È utile per gli scopi del Corso dare qualche cenno su quella che rappresenta la massima organizzazione internazionale di **regolamentazione** e **standardizzazione** nel campo delle telecomunicazioni: l'**ITU** (*International Telecommunications Union*).

L'esigenza di armonizzare le tecnologie delle telecomunicazioni è stata presente fin dai tempi della telegrafia, che costituisce il primo sistema di telecomunicazione sviluppato: in Francia (Parigi, 1865) nacque con lo sviluppo del Telegrafo un Ente di regolamentazione, l'Unione Telegrafica Internazionale, per favorire le comunicazioni tra i vari Stati mediante tale tecnica.

Con l'invenzione della Radio tale Ente prese il nome di ITU (1934). Dopo la Seconda Guerra Mondiale, nel 1947, l'ITU divenne infine un'**Agenzia dell'ONU**. Quasi tutte le Nazioni aderiscono ad essa.

Come per tutte le agenzie dell'ONU, le decisioni dell'ITU non hanno di per sé validità legale all'interno delle singole legislazioni nazionali, ma è lasciato alle singole Nazioni il compito di legiferare in materia attenendosi alle indicazioni dell'ITU, che anche in tal senso sono indicate come “**Raccomandazioni**”.

Tra i compiti dell'ITU rientra l'indicazione di regole per un utilizzo ordinato ed efficiente dello **spettro radio**, tipica risorsa sovra-nazionale. Altro compito dell'ITU è quello di definire le caratteristiche generali degli standard di nuovi sistemi di telecomunicazione (ad es. sistemi di telefonia mobile di III generazione, Radio e Televisione digitale, ecc.).

L'ITU è strutturata in **tre** Settori: l'**ITU-R** (Radiocomunicazioni), che si occupa di dettare le regole per l'uso più efficiente possibile dello spettro radio; l'**ITU-T** (Telecomunicazioni), che si occupa di introdurre nuovi standard; l'**ITU-D** (*Development*), che si occupa di promuovere le nuove tecnologie delle telecomunicazioni nei Paesi in via di sviluppo.

Precedentemente l'ITU-R si chiamava CCIR (Comitato Consultivo Internazionale per le Radiocomunicazioni) e l'ITU-T si chiamava CCITT (Comitato Consultivo Internazionale per la Telegrafia e la Telefonia).

Da un punto di vista operativo, per affrontare i singoli problemi tecnici posti in discussione, all'interno dell'ITU sono costituiti opportuni **gruppi di studio**, composti da specialisti del problema da affrontare, appartenenti a Istituti di ricerca, Università, Industrie elettroniche, Organismi governativi del settore TLC: Le soluzioni tecniche fornite dai gruppi di studio vengono discusse nell'ambito prima di Assemblee Regionali (ad es. a livello europeo) e successivamente di Conferenze Mondiali, per infine essere approvate sotto forma di **Raccomandazioni**. Un altro prodotto dell'ITU sono i **Rapporti tecnici**.

In questo Corso faremo riferimento alle Raccomandazioni emesse dall'ITU-R.

Un altro compito importante dell'ITU è quello di aggiornare il **Regolamento delle Radiocomunicazioni** (*Radio Regulations*), che indica le modalità di utilizzo dello spettro radio.

A livello continentale e nazionale esistono anche altri Enti che si occupano di regolamentazione, in questo caso anche con valore di legge, interagendo con l'ITU. In Italia le regole sono dettate dal Ministero delle Comunicazioni. Nell'UE un ruolo importante è ricoperto dall'**ETSI** (*European Telecommunication Standard Institute*), che si occupa di promuovere nuovi standard validi per l'Europa (ad es. GSM, UMTS, DVB), in armonia con le indicazioni generali date dall'ITU.

Secondo quanto riportato nel Regolamento delle Radiocomunicazioni, lo **spettro radio** è stato suddiviso dall'ITU in **bande**, indicate da un numero intero  $N$ ; l'estensione della banda  $N$  è  $(3 \cdot 10^{N-1}, 3 \cdot 10^N] \text{ Hz}$ , o in termini di lunghezza d'onda  $[10^{8-N}, 10^{9-N}) \text{ m}$ . Ad esempio, la banda numero 6 è compresa tra  $300 \text{ kHz}$  e  $3 \text{ MHz}$ .

Le differenti bande sono indicate anche con degli **acronimi**, secondo quanto indicato nella Tabella seguente, che riporta le bande principali:

$N$	<i>Acronimo</i>	<i>Estensione (f)</i>	<i>Estensione (<math>\lambda</math>)</i>	<i>Nome italiano</i>
4	VLF ( <i>Very Low Frequencies</i> )	$(3,30] \text{ kHz}$	$[10,100) \text{ km}$	Onde miriametriche
5	LF ( <i>Low F.</i> )	$(30,300] \text{ kHz}$	$[1,10) \text{ km}$	Onde chilometriche
6	MF ( <i>Medium F.</i> )	$(0.3,3] \text{ MHz}$	$[100,1000) \text{ m}$	Onde ettometriche o medie
7	HF ( <i>High F.</i> )	$(3,30] \text{ MHz}$	$[10,100) \text{ m}$	Onde decametriche o corte
8	VHF ( <i>Very H. F.</i> )	$(30,300] \text{ MHz}$	$[1,10) \text{ m}$	Onde metriche o ultracorte
9	UHF ( <i>Ultra H. F.</i> )	$(0.3,3] \text{ GHz}$	$[0.1,1) \text{ m}$	Onde decimetriche o microonde
10	SHF ( <i>Super H. F.</i> )	$(3,30] \text{ GHz}$	$[1,10) \text{ cm}$	Onde centimetriche o microonde
11	EHF ( <i>Extremely H. F.</i> )	$(30,300] \text{ GHz}$	$[1,10) \text{ mm}$	Onde millimetriche
12	/	$(300,3000] \text{ GHz}$	$[0.1,1) \text{ mm}$	Onde decimillimetriche

A titolo di esempio, la banda VLF è utilizzata per i collegamenti con i mezzi sottomarini; la banda LF è utilizzata per collegamenti radio oltre l'orizzonte ottico; la banda MF per i servizi di radiodiffusione (radiofonia); le bande VHF e UHF per le trasmissioni televisive da rete terrestre; la banda SHF per i collegamenti via satellite. Infine la banda 12 a tutt'oggi serve solo per usi sperimentali.

Si osserva che in questo tipo di ripartizione, le ampiezze delle bande crescono esponenzialmente al crescere della frequenza, e nel caso delle bande più alte l'estensione di frequenza è molto grande e quindi troppo generica in termini di indicazione di frequenza. Per ovviare a questa difficoltà, esiste anche una divisione in bande di estensioni più ristrette, ma non ufficializzata a livello internazionale dall'ITU e quindi per essa le interpretazioni delle estensioni delle singole bande possono variare.

Questa suddivisione fa corrispondere ad ogni banda una lettera, secondo quanto indicato nella Tabella della pagina seguente, con riferimento alle bande più utilizzate.

Si osserva come tutte queste bande siano comprese quasi esclusivamente in sole due bande ITU (UHF e SHF), per cui effettivamente con esse si ha una suddivisione dello spettro in bande più ristrette e quindi maggiormente indicative.

<i><b>Banda</b></i>	<i><b>Possibile Estensione (GHz)</b></i>	<i><b>Estensione approssimata (GHz)</b></i>
<i>F</i>	0,22 – 0,39	
<i>L</i>	0,39 – 1,55	intorno al GHz
<i>S</i>	1,55 – 4,20	2 - 4
<i>C</i>	4,20 – 5,75	4 – 6
<i>X</i>	5,75 – 10,9	6 – 10
<i>K</i>	10,9 - 36	suddivisa in due sottobande:
<i>K<sub>u</sub></i>		10 - 14
<i>K<sub>a</sub></i>		20 - 30
<i>Q</i>	36 - 46	
<i>V</i>	46 - 56	

In ambito ITU i differenti tipi di **sistemi di telecomunicazione** sono classificati in termini di tipologie di “**servizi**” all'interno dei quali essi operano.

In particolare, sono definiti i seguenti principali tipi di servizio:

- servizio **fisso**: comunicazioni radio tra due punti fissi sulla superficie terrestre;
- servizio **fisso via satellite**: comunicazioni radio tra stazioni fisse sulla superficie terrestre, mediante l'utilizzo di un ripetitore satellitare;
- servizio **mobile**: comunicazione radio tra due stazioni di cui almeno una è mobile;
- servizio **mobile aeronautico**: comunicazioni tra un aereo e un altro aereo oppure tra un aereo ed una stazione fissa terrestre;
- servizio **mobile marittimo**: comunicazioni tra nave e nave oppure tra nave e terraferma;
- servizio **mobile terrestre**: servizi mobili tra stazioni sulla superficie terrestre;
- servizio di **radiodiffusione**: comunicazione in *broadcasting* (punto – multipunto, o anche detta “*circolare*”, ad es. radio e TV);
- servizio di **radiolocalizzazione**: i radar;
- servizio di **radionavigazione**: servizi radio necessari per il controllo della navigazione marittima ed aerea;
- servizio di **radioamatore**: privati che comunicano in modo amatoriale in una precisa porzione dello spettro;
- servizio di **radioastronomia**: radiotelescopi, che hanno lo scopo di captare segnali radio provenienti dallo spazio.

Nel Regolamento delle Radiocomunicazioni dell'ITU, ad ognuno di questi servizi è assegnata una o più bande di frequenza in cui ciascuno deve operare. Per ragioni storiche, la Terra è stata ripartita in 3 Regioni, al cui interno le attribuzioni delle frequenze ai vari servizi possono anche leggermente differire.

Può anche avvenire che in una stessa banda di frequenze siano ammessi più servizi, di cui eventualmente uno definito **primario** (ovvero con priorità su gli altri) ed i restanti **secondari**. In Italia tale assegnazione ITU è stata recepita dal Ministero delle Comunicazioni, che la ha tradotta nel **Piano nazionale delle frequenze**. Le concessioni delle frequenze per i vari servizi sono gestite dal Ministero delle comunicazioni o dal Ministero della Difesa.

Dal Piano Nazionale delle Frequenze (reperibile nel sito web [www.comunicazioni.it](http://www.comunicazioni.it)), si può osservare ad es. che la banda tra 526,5 e 1606,5 *kHz* (delle onde medie) è stata assegnata al servizio di radiodiffusione del suono in AM, mentre la radiodiffusione del suono in FM usa la banda tra 87,5 e 108 *MHz*. Quest'ultima risulta tra l'altro la porzione di spettro radio in assoluto più pesantemente impegnata.

## RUMORE ESTERNO

Costituisce quella parte del rumore complessivo da cui è interessato un sistema di radiocomunicazione, che si genera **esternamente** agli apparati trasmettente e ricevente, nel dielettrico in cui avviene la propagazione delle onde radio. È tuttavia prassi considerare come rumore esterno anche quello che si genera internamente alle antenne trasmettente e ricevente, che assieme al dielettrico interposto costituiscono il “canale radio” come da noi prima definito:



Normalmente però il rumore generato internamente all'antenna trasmettente può essere ignorato, così come quello interno al trasmettitore, in quanto in quel punto del sistema di telecomunicazione c'è di norma una potenza di segnale utile elevata e quindi - dato il basso livello del rumore - un rapporto segnale/rumore molto elevato.

In ambito ITU, il rumore esterno è detto **radio noise**. Esiste una Raccomandazione dell'ITU-R (P-372, dove “P” sta per “Propagazione”), che indica le modalità per quantificare i vari contributi di rumore esterno, ed alla quale faremo prevalentemente riferimento.

Molteplici sono le cause fisiche di rumore esterno, tuttavia in ciascuna banda di frequenza normalmente non sono presenti tutti i tipi di rumore esterno: di conseguenza è conveniente studiare i differenti tipi di rumore in corrispondenza delle diverse bande di lavoro in cui ciascuno di essi risulta prevalente, a partire dalle bande più basse.

### Rumore atmosferico-meteorologico (bande VLF, LF, MF, HF)

Le onde radio che si propagano nell'atmosfera subiscono un disturbo proveniente dalle scariche elettrostatiche di origine meteorologica, di cui l'evidenza maggiore è rappresentata dai fulmini. Queste scariche sono disturbi di tipo **impulsivo** e occupano perciò una banda molto estesa di frequenze. L'entità di tale disturbo decresce al crescere della frequenza, diventando trascurabile rispetto ad altre fonti di rumore per frequenze superiori a qualche decina di *MHz*. Tali disturbi sono imprevedibili, per cui non è realistico farne una trattazione deterministica ma bisogna ragionare in termini di **valori medi statistici**. L'entità di tale disturbo presenta alcune caratteristiche tipiche, che illustriamo. Una prima caratteristica è la dipendenza dalla stagione dell'anno considerata: nella stagione estiva infatti le scariche elettriche sono più frequenti rispetto a quella invernale. Inoltre c'è una

dipendenza dalla fascia oraria considerata. Geograficamente infine, il rumore atmosferico è massimo intorno alle latitudini tropicali e decresce avvicinandosi ai poli, dove raggiunge mediamente i valori minimi. A parità di latitudine esso dipende notevolmente dalla longitudine.

Questo tipo di rumore è stato quantificato attraverso delle mappe a curve di livello ottenute in base a campagne di misura condotte dall'ITU-R.

Ad es. nella figura 30a a pagina 6 è rappresentato il valore del rumore atmosferico meteorologico in Estate, nella fascia oraria dalle 12:00 alle 16:00 (stagione ed ora locale).

Il parametro riportato  $F_{am}$  è il valore **mediano** (ovvero quel valore che ha il 50% di probabilità di essere superato) della **cifra di rumore d'antenna**  $F_a$ , da non confondere con quella di un quadripolo, definita come:

$$F_a^{\text{def}} = \frac{P_{nd}}{k T_0 B}, \text{ dove con } P_{nd} \text{ si è indicata la potenza media di rumore disponibile in uscita}$$

dall'antenna nella banda  $B$  considerata, tipicamente qualche  $\text{kHz}$ , per cui il parametro può essere considerato di tipo puntuale rispetto alla frequenza.  $T_0$  indica la temperatura standard (290 K). In analogia con i modelli di rumore introdotti per un bipolo, è possibile parlare di **temperatura (equivalente) di rumore d'antenna**, così relazionata alla cifra di rumore:

$$F_a^{\text{def}} = \frac{P_{nd}}{k T_0 B} = \frac{k T_a B}{k T_0 B} = \frac{T_a}{T_0} \Rightarrow T_a^{\text{def}} = F_a T_0.$$

La frequenza a cui sono state effettuate le misure sperimentali riportate nelle mappe dell'ITU-R è pari a 1 MHz.

Dalle curve di livello della figura 30a si osserva che per l'Italia (punto della mappa di latitudine  $40^\circ$  Nord e longitudine  $15^\circ$  Est) il valore è intorno ai 45 dB.

Nella figura 18a invece è rappresentata la situazione invernale, sempre nella fascia oraria dalle 12:00 alle 16:00. Per i motivi anzidetti, i valori sono notevolmente più bassi, per l'Italia attorno ai 30 dB.

Nella figura 32a (pagina 7) sono rappresentati nuovamente i valori estivi ma nella fascia notturna 20:00 – 24:00, che risultano notevolmente più elevati dei corrispondenti diurni: per l'Italia 70 dB. L'aumento è dovuto a un fenomeno di **allargamento dell'orizzonte radio**: durante il giorno la radiazione solare ionizza alcuni strati dell'atmosfera che in conseguenza della ionizzazione assorbono le radiazioni elettromagnetiche in essi incidenti. Di notte, in mancanza di tale forte ionizzazione, l'assorbimento atmosferico è minore e un'antenna è in grado di captare segnali e disturbi provenienti anche da sorgenti lontane, sfruttando la riflessione ionosferica delle relative onde radio. Quindi nelle ore notturne il rumore aumenta perché l'antenna capta disturbi provenienti anche da zone geografiche più lontane.

Nella figura 30b (pagina 7) è rappresentato l'andamento in frequenza della  $F_{am}$  distinta in una famiglia di curve. Fissato il sito e letto un certo valore in dB sulla mappa di fig. 30a, il valore del rumore alla frequenza di interesse lo si legge sulla corrispondente curva in dB della figura 30b. Ad es, in corrispondenza di un valore di 80 dB letto sulla mappa della figura 30a (che abbiamo detto essere riferito alla frequenza di lavoro di 1 MHz), sulla curva corrispondente della figura 30b si legge un valore di 110 dB se si lavora alla frequenza di 300 kHz, mentre si scende a 45 dB se si lavora a 5 MHz. In generale si nota una forte dipendenza dalla frequenza, con un *trend* alla decrescita al crescere della frequenza. Come risulta in generale dalle mappe riportate, i contributi di rumore meteorologico nelle bande basse di frequenza sono molto elevati.

Per questo motivo nelle bande di frequenza MF della radio AM il rapporto segnale/rumore

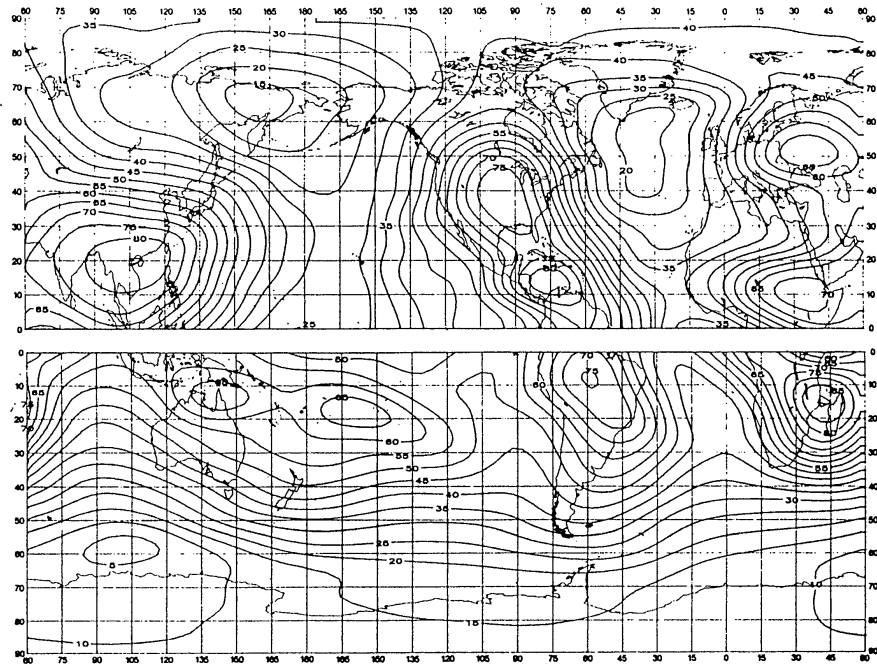


FIGURE 30a – Expected values of atmospheric radio noise,  $F_{arn}$  (dB above  $kT_0 b$  at 1 MHz) (Summer; 1200-1600 LT)

D48-1c

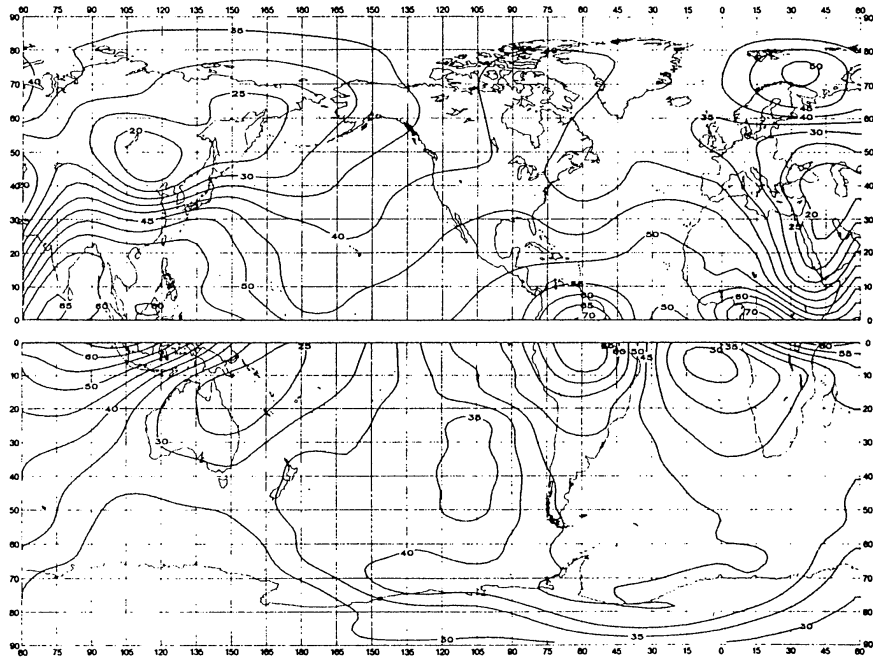


FIGURE 18a – Expected values of atmospheric radio noise,  $F_{arn}$  (dB above  $kT_0 b$  at 1 MHz) (Winter; 1200-1600 LT)

D14-4c

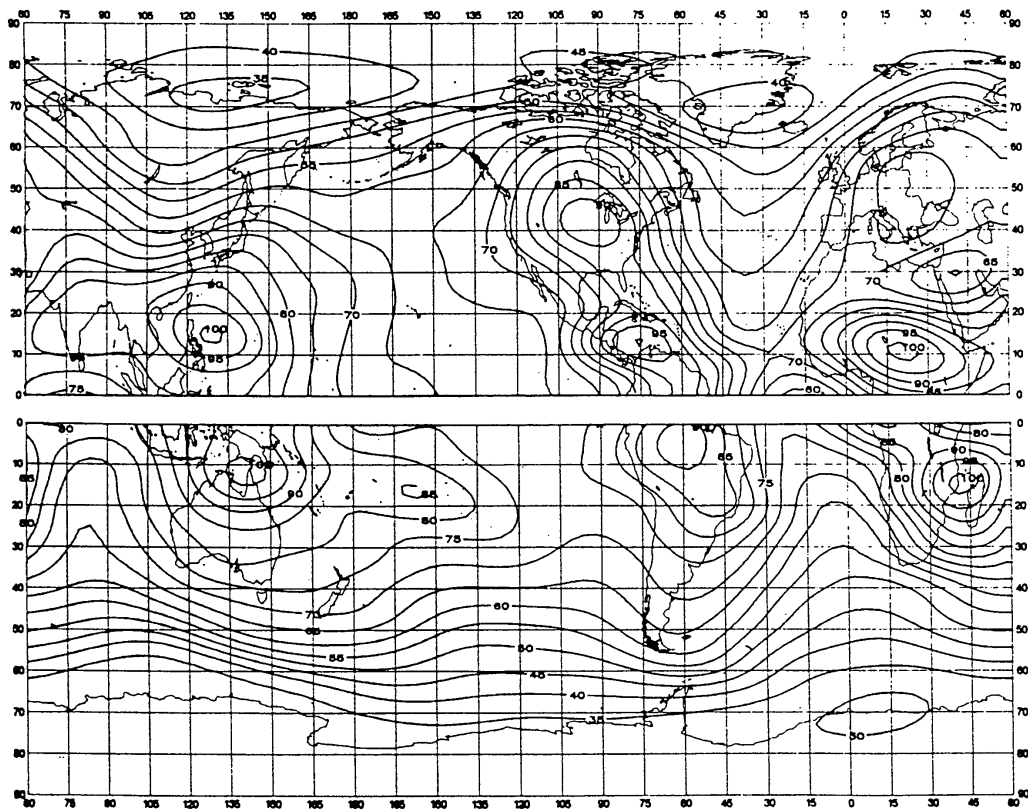


FIGURE 32a – Expected values of atmospheric radio noise,  $F_{am}$  (dB above  $kT_0 b$  at 1 MHz) (Summer; 2000-2400 LT)

FIGURE 10  
Median values of man-made noise power  
for a short vertical lossless grounded monopole antenna

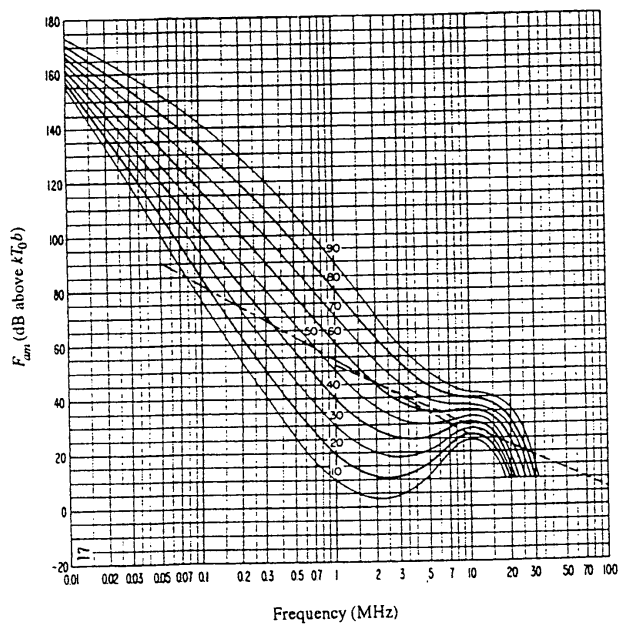
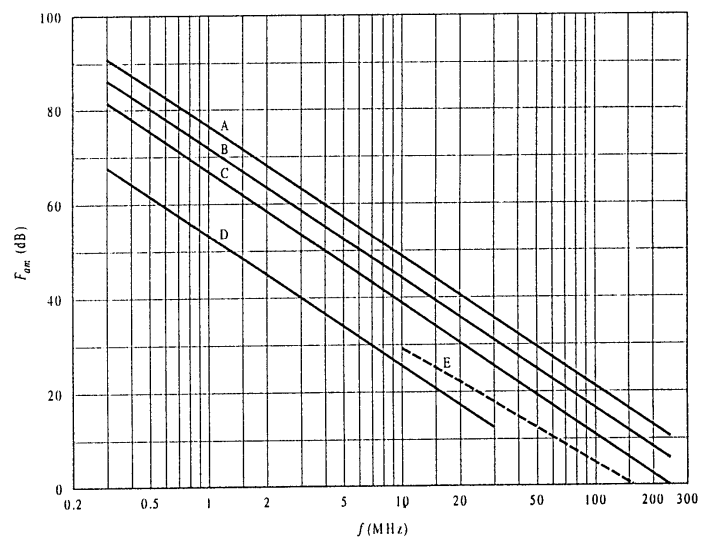


FIGURE 30b – Variation of radio noise with frequency  
(Summer; 1200-1600 LT)



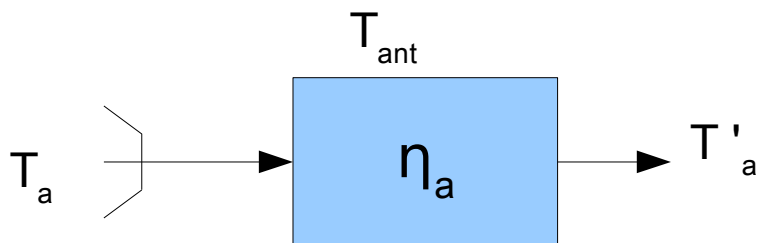
Environmental category:  
Curves A: business  
B: residential  
C: rural  
D: quiet rural  
E: galactic (see § 6)

assume valori contenuti, a dispetto di potenze di trasmissione elevate: trovandosi a operare intorno a 1 MHz, la radiodiffusione in modulazione di ampiezza sconta infatti un rumore atmosferico molto alto.

I valori riportati nella Raccomandazione ITU-R citata sono riferiti ad un'antenna ideale (nel senso di priva di perdite interne dissipative), filare corta (distribuzione di corrente triangolare) del tipo a monopolo verticale su superficie PEC. Sono però applicabili ad antenne **verticali** reali con perdite, una volta noto il **rendimento o efficienza energetica** dell'antenna  $\eta_a$ , definito come rapporto tra potenza radiata dall'antenna e potenza in ingresso all'antenna. Infatti l'espressione della temperatura equivalente di rumore di un'antenna reale è:

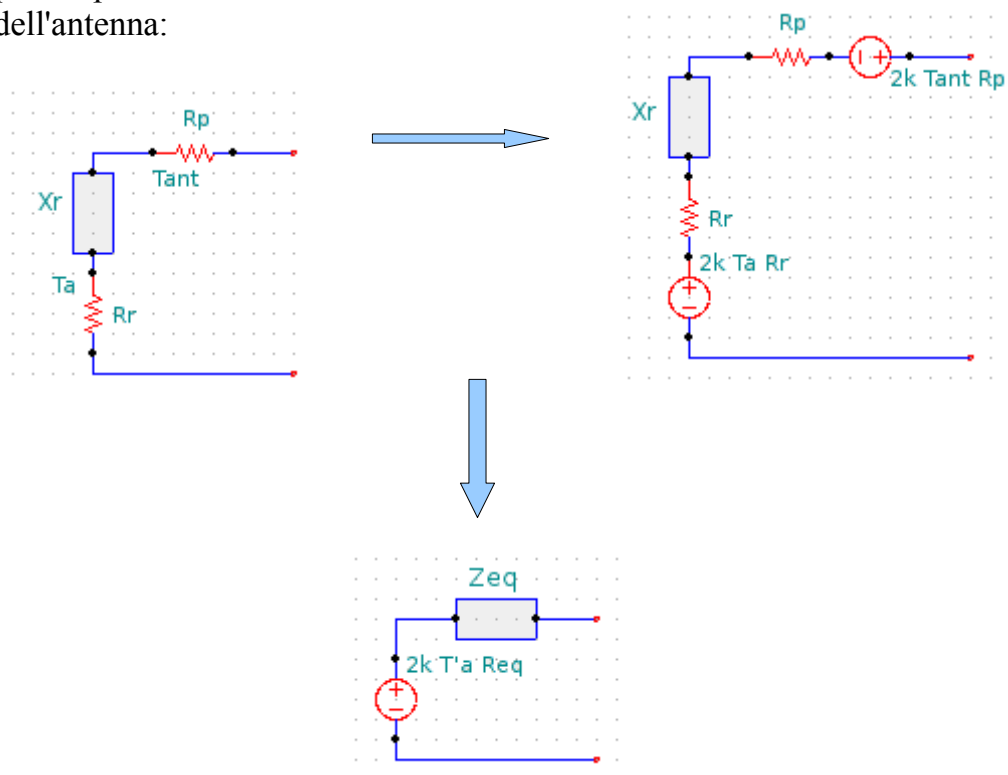
$$T'_a = \underbrace{\eta_a T_a}_{\text{contributo esterno all'antenna}} + \underbrace{(1-\eta_a) T_{ant}}_{\text{contributo delle perdite dell'antenna}}, \text{ dove si è indicato con } T'_a \text{ la temperatura di}$$

rumore dell'antenna reale, con  $T_a$  la temperatura di rumore dell'antenna ideale, che si ottiene ad es. dalle mappe viste e con  $T_{ant}$  la temperatura fisica (espressa in kelvin) a cui si trova l'antenna reale. Per giustificare tale espressione generale, conviene schematizzare un'antenna reale mediante il seguente schema a blocchi:



Da tale schema infatti, tenendo conto di quanto visto per il rumore di sistemi 2-porte passivi e considerato che  $\eta_a$  rappresenta il guadagno di potenza disponibile del blocco che tiene conto delle perdite, si ricava l'espressione sopra riportata della temperatura di antenna.

Peraltro questa può anche essere ricavata direttamente utilizzando il modello di tipo circuitale dell'antenna:





Quest'ultimo circuito è l'equivalente dell'antenna secondo Thévenin ai fini del rumore, dove  $R_r$  rappresenta la resistenza di radiazione,  $R_p$  la resistenza di perdita,  $X_r$  la reattanza dell'antenna e  $T'_a$  la temperatura equivalente di rumore dell'antenna. Andando a calcolare i parametri equivalenti del circuito di Thévenin si ottiene:

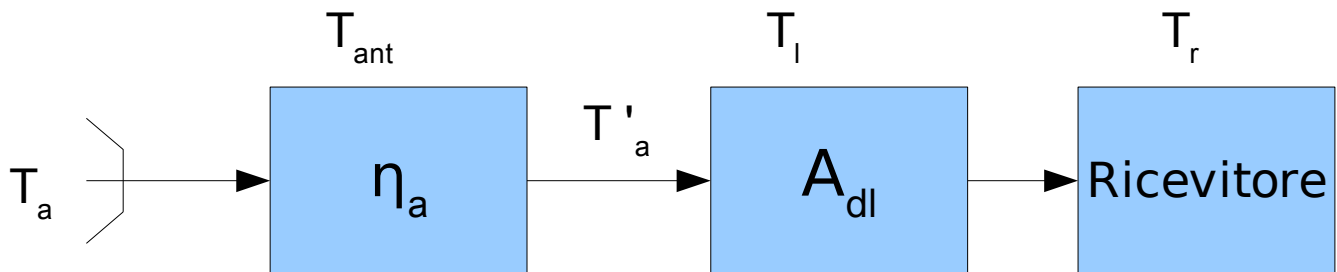
$$Z_{eq} = \underbrace{R_r + R_p}_{R_{eq}} + jX_r, \text{ mentre la densità spettrale di tensione equivalente complessiva}$$

è pari a:  $S_{vn}(f) = 2k(T_a R_r + T_{ant} R_p) \Rightarrow T'_a = \frac{R_r}{R_{eq}} T_a + \frac{R_p}{R_{eq}} T_{ant}$ , come prima ricavato

nell'espressione in cui compare  $\eta_a$ , tenuto conto che dalla definizione di rendimento energetico dell'antenna si ha:  $\eta_a = R_r/R_{eq}$ .

Si osservi che se il rendimento dell'antenna è molto basso, avviene che  $T'_a \rightarrow T_{ant}$ .

Il rumore **complessivo** di una catena ricevente, il cui schema a blocchi è riportato in figura, è quantificato dalla cosiddetta **temperatura di rumore di sistema**  $T_{sys}$ .



Se il ricevitore non è posto immediatamente a valle dell'antenna ricevente, la temperatura di rumore di sistema risulta pari alla somma (trattasi di contributi statisticamente indipendenti) di  $T'_a$ , dei contributi di rumore della linea di trasmissione (necessaria per collegare tra loro antenna ricevente e ricevitore) e di quelli del ricevitore, che si combinano secondo le regole già viste. Valutata in uscita dall'antenna, la  $T_{sys}$  si esprime allora:

$$T_{sys} = T'_a + T_r A_{dl} + T_l (A_{dl} - 1)$$

dove  $A_{dl}$  indica l'attenuazione disponibile della linea di trasmissione, supposta a temperatura  $T_l$ .

### Rumore *man-made* o antropico (bande LF, MF, HF, VHF, UHF)

Con il termine rumore **man-made** si intende quel disturbo radioelettrico generato da diverse attività dell'uomo: macchinari elettrici quali linee elettriche, motori elettrici, sistemi di accensione dei motori a scoppio, elettrodomestici, ecc.. Per poterlo stimare è opportuno distinguere in base al tipo di sito in cui il sistema di telecomunicazione si trova a operare.

L'ITU-R distingue 4 tipi di siti, a seconda della concentrazione di attività umane e di conseguenza di dispositivi responsabili del rumore man-made: **industriale (business)**, **residenziale (residential)**, **rurale (rural)** e **rurale tranquillo (quiet rural)**. Come il rumore atmosferico meteorologico, anche il rumore *man-made* presenta forte dipendenza dalla frequenza, decrescendo al crescere di questa, come si può vedere dalla figura 10 a pagina 7, che riporta il valore mediano della cifra di rumore per un'antenna dello stesso tipo di quella ipotizzata per le mappe del rumore meteorologico. È dunque necessario per

valutare la  $F_a$  tenere conto della **frequenza** di lavoro oltre che del **sito**. In linea generale, differentemente dal rumore meteorologico, il rumore man-made, come si osserva dalle curve riportate, è ancora significativo nelle bande VHF e nella prima parte delle UHF. Per un sito cittadino, l'ITU-R fornisce anche un'espressione analitica del valore mediano della cifra di rumore d'antenna, valida nell'intervallo di frequenze tra 200 e 900 MHz:

$$F_{am} = 44,3 - 12,3 \log_{10}(f) \quad \text{con } f \text{ espressa in MHz.}$$

Salendo in frequenza (**bande UHF, SHF**), il rumore meteorologico e quello *man-made* diventano trascurabili, mentre subentrano come fonte di rumore **prevalente** tre nuovi tipi di rumore:

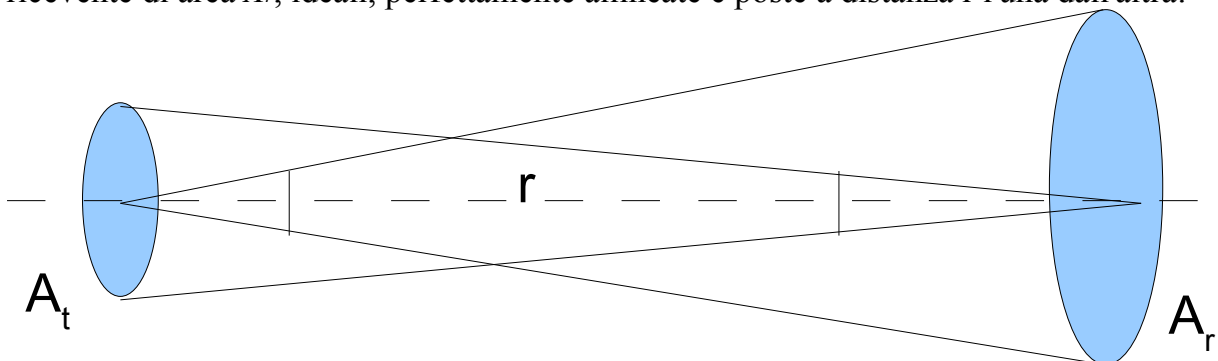
- rumore **galattico**: la nostra galassia, essendo formata da stelle, emette radiazioni elettromagnetiche su un'ampia gamma di frequenze comprese quelle radio. In realtà tali radiazioni sono presenti anche a frequenze più basse rispetto a quelle delle bande indicate, ma, specie al di sotto della banda VHF, giungono a terra fortemente attenuate dall'atmosfera terrestre;
- rumore da **assorbimento atmosferico**: alcune molecole presenti nell'atmosfera (ossigeno e acqua) hanno la proprietà di assorbire energia elettromagnetica e reirradiarla in forma di rumore;
- rumore del **terreno**, dipendente in gran parte dallo stato termico della superficie terrestre.

Anche se per quantificarli è opportuno distinguere tra loro questi tre tipi di rumore, tuttavia essi derivano tutti, direttamente o indirettamente, dalla radiazione che proviene dalla nostra galassia.

Nella banda di frequenze compresa tra qualche decina di MHz e 1 GHz, il rumore preponderante è quello antropico insieme a quello galattico (come si può vedere dalla figura 10 citata); al di sopra di qualche GHz il rumore galattico diventa trascurabile rispetto a quello di assorbimento atmosferico e del terreno.

Per quantificare complessivamente questi tipi di rumore è necessario introdurre un modello di temperatura equivalente più generale di quello legato alla cifra di rumore d'antenna finora utilizzato: questo perché per caratterizzare questi contributi di rumore bisogna tenere conto sia della **direttività** dell'antenna che dell'**ambiente elettromagnetico** che la circonda, del quale è necessario conoscere per ogni direzione di osservazione considerata i diversi contributi di radiazione da essa provenienti. Per i tipi di rumore precedentemente trattati ciò non era necessario, perché si poneva l'ipotesi che il disturbo arrivasse all'antenna mediamente con la stessa intensità da tutte le direzioni.

Per introdurre questa **espressione generale** della temperatura di rumore di antenna, partiamo dal considerare due antenne ad apertura, una trasmittente di area  $A_t$  ed una ricevente di area  $A_r$ , ideali, perfettamente allineate e poste a distanza  $r$  l'una dall'altra:



Supponiamo di essere in condizioni di campo lontano e che le onde emesse dall'antenna trasmittente siano localmente piane sull'antenna ricevente. Considerando anche ideale l'apertura dell'antenna ricevente, il vettore di Poynting  $\vec{S}_t = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}$  potrà essere supposto costante in tutti i punti di essa. Consideriamo infine gli angoli solidi sottesi dalle due aperture, indicati nella figura:  $\Omega_t = \frac{A_t}{r^2}$  ;  $\Omega_r = \frac{A_r}{r^2}$  .

La potenza disponibile in uscita dall'antenna ricevente si esprime  $P_r = S_t A_e$  , che rappresenta la nota relazione tra densità di potenza  $S_t$  incidente sull'antenna e potenza disponibile in uscita dall'antenna, dove  $A_e$  è l'area efficace dell'antenna ricevente, che in questo caso (apertura ideale) eguaglia l'area fisica dell'antenna  $A_r$  .

In trasmissione, un parametro caratterizzante un'antenna è l'**intensità di radiazione**, definita come:  $I_t(\vartheta, \varphi) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dP_t}{d\Omega} = \frac{S_t \cdot dA}{d\Omega} = \frac{S_t \cdot dA}{dA/r^2} = S_t \cdot r^2 \left[ \frac{W}{sr} \right] \Rightarrow S_t = \frac{I_t}{r^2}$  .

Nella relazione scritta  $(\vartheta, \varphi)$  indica la particolare direzione di radiazione considerata, in un riferimento sferico,  $d\Omega$  un angolo solido infinitesimo attorno alla direzione considerata,  $dP_t$  la potenza media trasmessa entro l'angolo solido  $d\Omega$ ,  $dA$  una sezione di tale angolo solido a distanza  $r$  dall'antenna e  $S_t$  la densità di potenza radiata, valutata a tale distanza. Sostituendo questo risultato nell'espressione della potenza ricevuta si ha:

$$P_r = S_t \cdot A_r = \frac{I_t}{r^2} \cdot A_r .$$

Il parametro intensità di radiazione è adatto a caratterizzare l'emissione di sorgenti **puntiformi**, come ad es. può essere considerata un'antenna trasmittente vista a grande distanza. Il rumore esterno, però, proviene da tutta la superficie della volta celeste, quindi per caratterizzarne l'emissione serve un parametro che tenga conto della superficie che emette. Tale parametro è rappresentato dalla **radianza**, definita come intensità di radiazione per unità di superficie emittente, nel nostro esempio:

$$B(\vartheta, \varphi) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_t(\vartheta, \varphi)}{A_t} \left[ \frac{W}{sr \cdot m^2} \right]$$

Possiamo allora esprimere la potenza disponibile in uscita dalla nostra antenna ricevente in funzione della radianza della sorgente (l'apertura  $A_t$ ):

$$P_r = \frac{I_t}{r^2} A_r = B \cdot \underbrace{\frac{A_t}{r^2}}_{\Omega_t} \cdot A_r = B \Omega_t A_r$$

Riferiamoci ora ad una situazione, più generale di quella finora ipotizzata, in cui l'antenna ricevente capta energia e.m. **proveniente da tutte le direzioni**, ed estendiamo la formula a questa nuova situazione. Essendo in generale direttiva, l'antenna capta diversamente, a seconda della direzione che stiamo considerando. Relativamente ad un angolo solido infinitesimo  $d\Omega$  , la potenza disponibile all'uscita dell'antenna si può quindi esprimere come:

$dP_r = A_e \cdot F_n(\vartheta, \varphi) B(\vartheta, \varphi) d\Omega$  , dove  $F_n$  è il solido di radiazione d'antenna normalizzato:

$$F_n(\vartheta, \varphi) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{S_t(r, \vartheta, \varphi)}{S_{t_{max}}} \leq 1 .$$

L'ultimo passo è considerare non la **radianza complessiva** ma quella **spettrale**, dato che ci interessa valutare la potenza di rumore entro una determinata banda di frequenze.

La **radianza spettrale** è definita come:  $B_f(\vartheta, \varphi) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dB(\vartheta, \varphi)}{df} \left[ \frac{W}{sr \cdot m^2 \cdot Hz} \right]$ .

Con questo parametro possiamo calcolare la potenza media in uscita dall'antenna ricevente su una banda qualunque  $(f_1, f_2)$ :

$$P_r = A_e \int_{f_1}^{f_2} \int_{4\pi} B_f(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega df.$$

Il rumore esterno è una radiazione elettromagnetica non polarizzata, al contrario delle onde e. m. emesse dalle normali antenne. Si ipotizza che esso sia presente mediamente con la stessa intensità in tutte le possibili polarizzazioni, quindi un'antenna riceverà mediamente solo la metà della potenza, ovvero quella relativa alle componenti del campo e.m. del rumore parallele alla polarizzazione dell'antenna ricevente (componenti copolari). Quindi in conclusione dobbiamo scrivere, per sorgenti non polarizzate:

$$P_r = \frac{1}{2} A_e \int_{f_1}^{f_2} \int_{4\pi} B_f(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega df.$$

Se ci interessa il contributo di potenza **nella banda infinitesima** questo si esprime:

$$dP_r = \frac{1}{2} A_e \int_{4\pi} B_f(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega df.$$

È interessante considerare il caso particolare in cui la radianza spettrale che raggiunge l'antenna sia costante da tutte le direzioni:  $B_f(\vartheta, \varphi) \approx B_f$ . L'espressione della potenza ricevuta risulta, in questo caso:

$$dP_r = \frac{1}{2} A_e B_f \int_{4\pi} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega df.$$

E' utile introdurre il parametro **angolo solido di antenna**, collegato alle caratteristiche di direttività dell'antenna:

$$\Omega_a \stackrel{\text{def}}{=} \int_{4\pi} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega = \int_{4\pi r^2} \frac{S_t(r, \vartheta, \varphi)}{S_{tmax}} \cdot \frac{ds}{r^2}; \text{ integrando su una superficie sferica la densità di}$$

potenza radiata da un'antenna, otteniamo la potenza totale radiata  $P_{irr}$ , quindi l'espressione dell'angolo solido d'antenna diventa:

$$\Omega_a = \frac{P_{irr}}{S_{tmax} r^2} \equiv \frac{P_{irr}}{4\pi r^2} \cdot \frac{4\pi}{S_{tmax}} = \frac{4\pi}{D}, \text{ dove } D \text{ è la } \mathbf{direttività massima}, \text{ definita come}$$

$$D \stackrel{\text{def}}{=} \frac{S_{tmax}}{P_{irr}/4\pi r^2}. \text{ Sappiamo che per qualsiasi antenna vale la relazione } \frac{G}{A_e} = \frac{4\pi}{\lambda^2}; \text{ dato}$$

che facciamo riferimento ad un'antenna ideale (nel senso di priva di perdite), il guadagno coincide con la direttività:  $[G]_{\eta_a=1} = [\eta_a D]_{\eta_a=1} \equiv D$ . Sfruttando questa equivalenza,

l'espressione dell'angolo solido di un'antenna senza perdite risulta:  $\Omega_a = \frac{\lambda^2}{A_e}$ . Sostituendo

questo valore nell'espressione della densità di potenza ricevuta si ottiene infine:

$$dP_r = \frac{1}{2} A_e B_f \frac{\lambda^2}{A_e} \cdot df = \frac{1}{2} B_f \lambda^2 df$$

In questo caso particolare quindi, la potenza disponibile in uscita dall'antenna ricevente dipende dalla radianza spettrale e dalla frequenza, ma non dalle caratteristiche di maggiore o minore direttività dell'antenna. Utilizzeremo questo risultato successivamente.

## Radiazione termica della materia

Così come il rumore interno, anche il rumore esterno come abbiamo detto può provenire da varie cause, poiché varie sono le modalità con cui un corpo può emettere radiazioni elettromagnetiche. Come per il rumore interno, una di queste è l'**emissione termica**.

I fisici hanno definito il radiatore termico perfetto, detto **corpo nero**, nel senso che assorbe **completamente** ogni radiazione elettromagnetica incidente su esso, trasformandola in energia cinetica e la riemette secondo la legge trovata dal fisico Planck con radianza spettrale (unilatera):

$$B_{fbb} = \frac{2h f^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \left[ \frac{W}{sr \cdot m^2 \cdot Hz} \right] \quad (\text{legge di Planck}).$$

Non si osserva traccia di dipendenza dalla direzione, quindi il corpo nero è un radiatore isotropico.

La figura 1 a pag. 14 illustra l'andamento della radianza spettrale del corpo nero in funzione della frequenza, per alcuni valori di temperatura. Si osserva che, **alle radiofrequenze**, la radianza spettrale aumenta al crescere della frequenza. Più in generale, per ogni prefissata frequenza, la radianza aumenta al crescere della temperatura. Inoltre il punto di massimo di ciascuna curva è in corrispondenza di valori crescenti di frequenza, al crescere della temperatura. Poiché il corpo nero emette anche alle frequenze ottiche, se posto a temperature elevate esso potrà risultare non nero all'osservatore.

Esistono due approssimazioni della legge di Planck:

### 1) Legge di Rayleigh-Jeans

Si ottiene sviluppando l'esponenziale in serie di potenze:

$$e^x - 1 \simeq \left( 1 + x + \frac{x^2}{2} + \dots + \frac{x^n}{n!} \right) - 1. \quad \text{Nell'ipotesi che } x \ll 1, \text{ i termini di grado maggiore di 1}$$

possono essere trascurati, cioè si può considerare  $e^x - 1 \simeq x$ . Con questa approssimazione la legge di Planck assume la forma:

$$B_f = \frac{2h f^3}{c^2} \cdot \frac{kT}{hf} = 2k \frac{f^2}{c^2} \cdot T = \frac{2kT}{\lambda^2}, \quad \text{nota come } \textbf{approssimazione di Rayleigh-Jeans}, \text{ che}$$

rappresenta bene la legge di Planck **alle radiofrequenze**. La deviazione dell'approssimazione rispetto alla legge di Planck risulta sotto l'1% se  $\frac{f}{T} < 3,9 \cdot 10^8$ ; considerando una  $T \simeq 300 K$  l'approssimazione è quindi valida per  $f \leq 117 GHz$ .

### 2) Legge di Wien

Nel caso di  $x \gg 1$ , si ottiene una seconda approssimazione, valida per le frequenze al di sopra dello spettro radio. Essa si ottiene dall'espressione della legge di Planck, trascurandovi il termine  $-1$  al denominatore. Per gli interessi di questo Corso è pertinente l'approssimazione di Rayleigh-Jeans, visto che ci occupiamo di sistemi a radiofrequenza.

La figura 2 della pagina seguente mostra le due approssimazioni e la curva di Planck relativamente al caso di una temperatura di  $300 K$ : si osserva come già detto che l'approssimazione di Rayleigh-Jeans risulta adeguata nel range delle frequenze radio, mentre all'opposto la legge di Wien rappresenta bene la legge di Planck alle frequenze del visibile.

Fig. 1

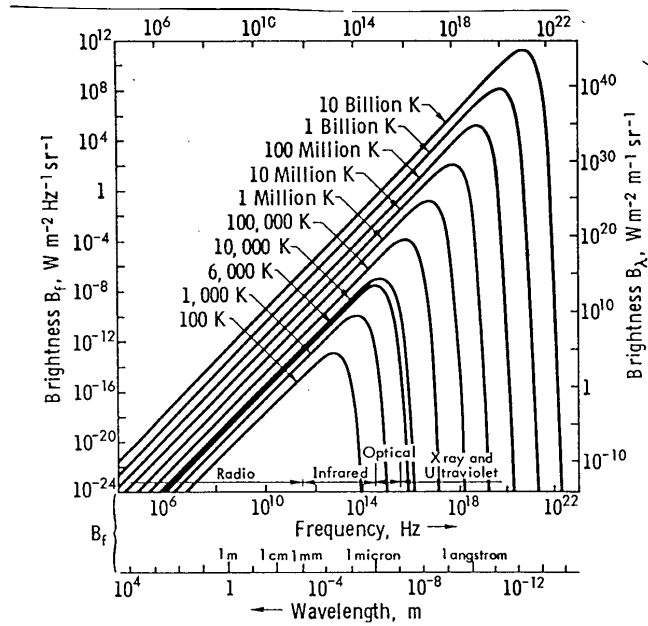


Fig. 2

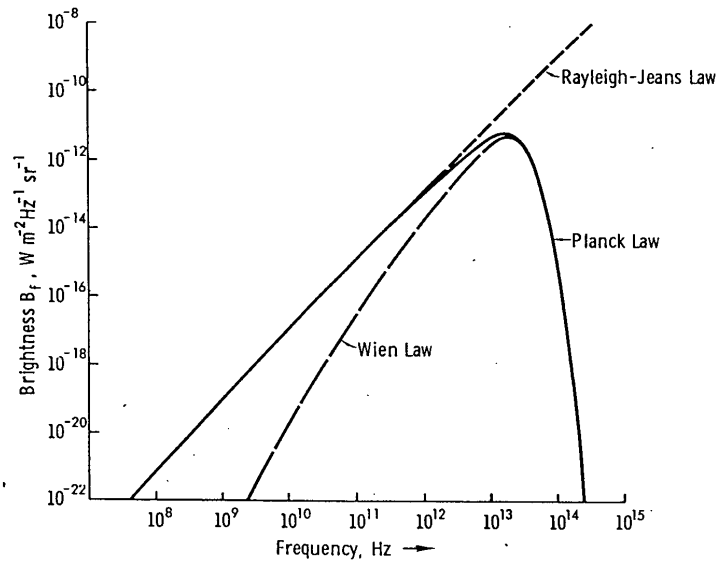
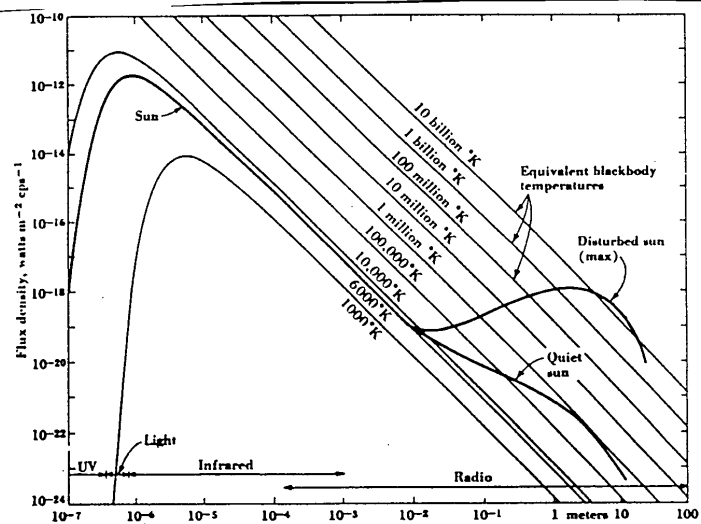


Fig. 3



### Esercizio

Supponiamo di avere un'antenna, priva di perdite, che “vede” un corpo nero in tutte le direzioni spaziali. Calcoliamo la potenza in uscita da quest'antenna. In base a quanto precedentemente ricavato possiamo scrivere:

$$dP_{nd} = \frac{1}{2} B_{fbb} \lambda^2 df = \frac{1}{2} \cdot \frac{2 h f^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \cdot \lambda^2 \cdot df = \frac{hf}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} df$$

La densità spettrale di potenza media di rumore in uscita dall'antenna risulta quindi essere:

$$\frac{dP_{nd}}{df} = \frac{hf}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}, \text{ che equivale come abbiamo visto a suo tempo all'espressione della legge}$$

di Planck per il rumore termico **interno**. Se ora chiudiamo l'uscita dell'antenna su di un carico **posto alla stessa temperatura del corpo nero** e di valore tale da essere in condizione di massimo trasferimento di potenza, cioè  $Z_c = R_r - jX_a$ , con  $R_r$  pari alla **resistenza di radiazione** dell'antenna (ideale) e  $X_a$  uguale alla **reattanza** dell'antenna, possiamo affermare che il corpo nero cede all'impedenza la sua densità spettrale di potenza media di rumore disponibile. Questa d'altra parte risulta essere la stessa che l'impedenza cede al corpo nero tramite l'antenna.

Questo risultato è corretto perché il corpo nero si trova alla stessa temperatura del carico, per cui, dalla seconda legge della termodinamica, l'energia media che i due sistemi si scambiano deve necessariamente essere la stessa.

-----

Dal punto di vista dell'emissione termica, un corpo fisico reale si definisce **grigio**, invece che nero, perché assorbe soltanto una parte dell'energia incidente, trasformandola in calore, mentre la restante parte viene “riflessa”, da cui il colore osservato. Considerato da un punto di vista emissivo, un corpo emette in misura minore o al limite uguale al corpo nero che si trovi alla sua stessa temperatura, inoltre la sua radianza spettrale dipende in generale dall'angolo da cui lo si osserva, per cui possiamo scrivere:  $B_f(\vartheta, \varphi) \leq B_{fbb}$ . Per caratterizzare la radiazione termica di un corpo conviene seguire il criterio di modellizzazione usato per il caso del rumore interno, cioè utilizzare il parametro **temperatura (di corpo nero) equivalente**. La radianza spettrale di un corpo grigio può quindi essere quantificata mediante appunto il parametro **temperatura equivalente**  $T_{bbe}$ . Utilizzando l'approssimazione di Rayleigh-Jeans possiamo quindi scrivere:

$$B_f(\vartheta, \varphi) = \frac{2 k T_{bbe}(\vartheta, \varphi)}{\lambda^2}. \text{ L'equivalenza è nel senso che se portiamo il corpo nero a}$$

temperatura  $T_{bbe}$ , la sua radianza sarà uguale a quella del corpo fisico a temperatura  $T$ .

Per quanto prima detto, risulta:  $T_{bbe}(\vartheta, \varphi) \leq T$ .

Può anche essere utile introdurre il parametro **emissività** di un corpo, in generale variabile con la frequenza:

$$e(\vartheta, \varphi) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{B_f(\vartheta, \varphi)}{B_{fbb}} = \frac{T_{bbe}(\vartheta, \varphi)}{T} \leq 1; \text{ mediante questo possiamo esprimere la radianza}$$

spettrale di un corpo fisico (che emetta solo per via termica) in termini di emissività:

$$B_f(\vartheta, \varphi) = \frac{2 k T}{\lambda^2} \cdot e(\vartheta, \varphi).$$

Finora abbiamo considerato solo l'emissione e.m. di origine termica. Per omogeneità di

trattazione, conviene caratterizzare anche qualsiasi altra forma di emissione e. m. che dia luogo a rumore esterno, mediante ancora il concetto di corpo nero equivalente; c'è da osservare però che nel caso in cui il corpo non irradia per via termica, la sua temperatura equivalente può essere anche maggiore della sua temperatura fisica, non avendo questa emissione alcuna relazione con lo stato termico.

In conclusione, caratterizziamo ogni sorgente di rumore esterno in termini di temperatura di corpo nero equivalente, perché questo ci consente sempre di esprimere formalmente la sua radianza spettrale con la formula di Rayleigh-Jeans vista sopra.

Seguendo questa procedura, la potenza disponibile in uscita dall'antenna ricevente nell'intervallo di frequenze infinitesimo  $df$  si esprime:

$$dP_{nd} = \frac{1}{2} A_e \int_{4\pi} \frac{2k T_{AP}(\vartheta, \varphi)}{\lambda^2} \cdot F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega df.$$

In questa espressione abbiamo indicato la temperatura di corpo nero equivalente con  $T_{AP}$  **temperatura apparente**: questo perché l'antenna può trovarsi a ricevere energia e. m. proveniente da più di un corpo contenuto all'interno di un certo angolo solido infinitesimo, e in tal caso associamo all'insieme dei corpi fisici un unico corpo nero equivalente, la cui temperatura equivalente indichiamo come “temperatura apparente”.

Se conosciamo la temperatura apparente, possiamo calcolare la densità di potenza captata dall'antenna, dalla quale infine perveniamo alla forma generale cercata della temperatura di rumore di un'antenna ricevente (priva di perdite):

$$\begin{aligned} \frac{dP_{nd}}{df} &= k T_a = \frac{k A_e}{\lambda^2} \int_{4\pi} T_{AP}(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega \Rightarrow \\ &\Rightarrow T_a = \frac{A_e}{\lambda^2} \int_{4\pi} T_{AP}(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega \end{aligned}$$

Come si vede, questo è un parametro di tipo puntuale (rispetto alla frequenza) e dipende in generale sia dalle caratteristiche dell'antenna che da quelle della sorgente.

Tornando all'espressione dell'angolo solido di antenna:  $\int_{4\pi} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega = \frac{4\pi}{D} = \frac{\lambda^2}{A_e}$  e utilizzandola nell'espressione della  $T_a$  si ottiene la forma equivalente:

$$T_a = \frac{\int_{4\pi} T_{AP}(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}.$$

Nelle antenne molto direttive può essere utile distinguere il rumore captato dal lobo principale rispetto a quello che proviene dai lobi secondari. A tal fine scriviamo l'integrale a numeratore della  $T_a$  nella forma di due integrali:

$$T_a = \frac{\int_{ml} T_{AP}(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\underbrace{\int_{4\pi} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}_{\text{lobo principale}}} + \frac{\int_{sl} T_{AP}(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\underbrace{\int_{4\pi} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}_{\text{lobi secondari}}}.$$

dove con **ml** si indica l'angolo solido sotteso dal lobo principale (ml=main lobe), definito ad es. dai valori del *pattern* normalizzato di antenna  $> 0,5$ , mentre tutto il resto definisce l'angolo solido **sl** dei lobi secondari (sl=side lobes). Da questa si perviene alla forma finale cercata:  $T_a = \eta_M T_{ML} + (1 - \eta_M) T_{SL}$  dove  $T_{ML}$  rappresenta la temperatura equivalente di rumore dell'antenna costituita dal solo lobo principale e, analogamente,  $T_{SL}$  la temperatura



equivalente di rumore dell'antenna costituita dall'insieme dei lobi secondari.

Le espressioni dei parametri introdotti sono quindi le seguenti:

$$T_{ML} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\int_{ml} T_{AP}(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{ml} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}, \quad T_{SL} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\int_{sl} T_{AP}(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{sl} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}$$

mentre  $\eta_M$ , “rendimento” del lobo principale, è definito necessariamente dall'espressione:

$$\eta_M \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\int_{ml} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}.$$

Utilizzeremo successivamente questa formula, per ricavare una stima di temperatura di antenna.

## Rumore galattico, di assorbimento atmosferico e del terreno

Il maggior contributo di rumore galattico proviene dal Sole, perché esso è più vicino a noi rispetto agli altri corpi celesti. Come si osserva dalla figura 3 a pagina 14 che riporta l'andamento della densità di potenza radiata dal Sole in funzione della lunghezza d'onda considerata, il Sole irradia come un corpo nero a circa 6000 K, se si considerano frequenze molto elevate (oltre i 30 GHz) ovvero lunghezze d'onda molto piccole (sotto il cm). Sotto i 30 GHz si ha invece un comportamento radiativo molto diversificato, compreso tra un minimo ed un massimo (*quiet-disturbed*), in dipendenza dello stato di attività della superficie del Sole, che come è noto presenta una periodicità di 11 anni. In ogni caso, sotto i 30 GHz la temperatura di corpo nero equivalente risulta sempre molto elevata, per cui il rapporto segnale/rumore di un collegamento radio con antenna ricevente molto direttiva risulta fortemente penalizzato quando il Sole entra nel lobo principale dell'antenna.

Escluso il Sole, ci sono altre parti abbastanza rumorose del cielo, in corrispondenza di puntamenti dell'antenna verso le zone centrali della nostra galassia e di alcune radiostelle.

La nostra galassia è del tipo a spirale ed i corpi stellari si addensano attorno all'asse della galassia, mentre il loro numero decresce via via che dal centro ci spostiamo verso l'esterno, mantenendoci tuttavia nel piano cui appartiene la galassia. Se quindi l'antenna ricevente è puntata verso il centro della galassia, essa sperimenterà un forte contributo di rumore, in quanto risulterà elevato il numero di corpi celesti compresi nel suo lobo principale.

Esistono delle **mappe radio del cielo**, utili per stimare il rumore galattico. La figura 4 a pagina 18 mostra una di queste mappe, ottenuta da misure fatte alla frequenza di 136 MHz.

Il tipo di mappa presentata è una rappresentazione piana della sfera celeste, analoga a quella utilizzata in Astronomia: per rappresentare la sfera celeste in due dimensioni, consideriamo le proiezioni dei vari corpi della sfera celeste su un cilindro indefinito il cui asse coincide con quello della Terra. Poi apriamo il cilindro con un taglio verticale, lo distendiamo su di un piano e infine comprimiamo in senso verticale tale superficie, in modo da riportarla a dimensioni verticali finite, ottenendo una rappresentazione piana che è quella della figura 4. I valori riportati nella mappa indicata sono relativi alla temperatura di corpo nero equivalente, ed oscillano (alla frequenza indicata) tra 200 e 3000 K.

Quindi, conoscendo la zona del cielo verso cui punta il lobo principale di un'antenna fortemente direttiva, possiamo stimare il contributo di rumore galattico a quella frequenza, in termini di temperatura equivalente. Esistono in letteratura delle formule che permettono di relazionare tale temperatura con quella relativa ad una frequenza diversa.

Fig. 4

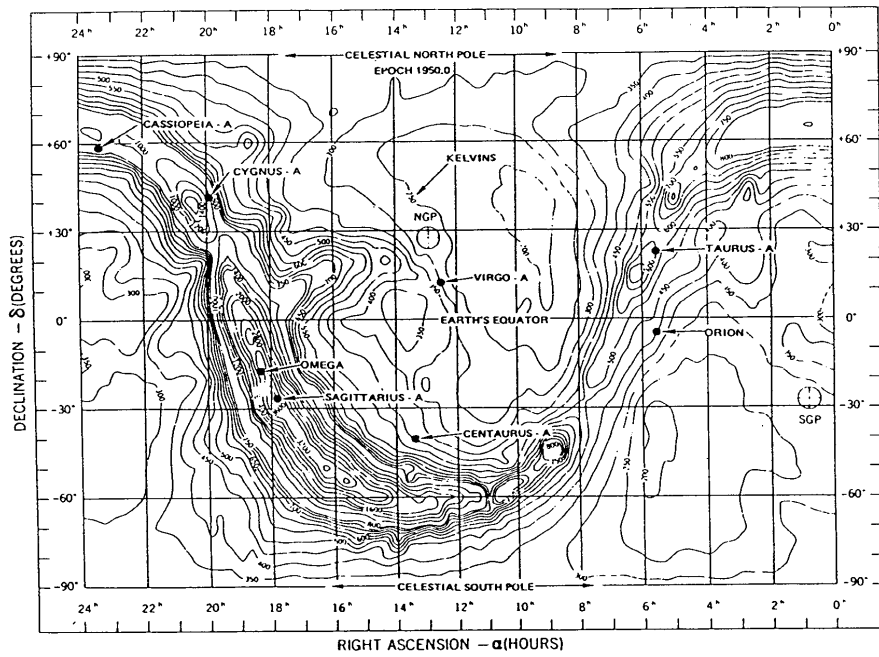
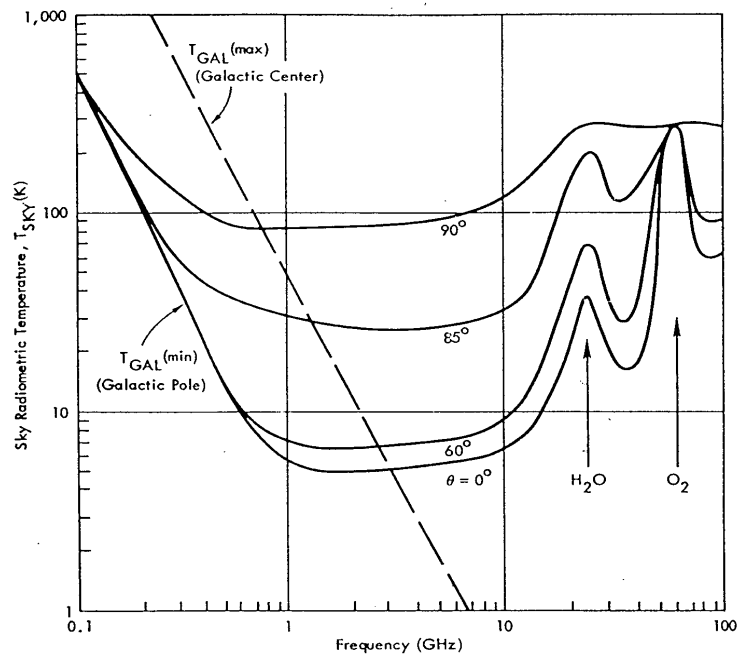


Fig. 5



(cielo sereno)

Ad es. l'ITU-R nella Raccomandazione P-372 suggerisce la seguente relazione:

$$T_{bbe}(f) = T_{bbe}(f=136)(f/136)^{-2,75}.$$

Un'antenna che punta un satellite geostazionario, nel corso delle 24 ore punterà tutti i punti di uno stesso parallelo celeste, e il rumore varierà quindi tra un minimo ed un massimo. Per le normali applicazioni delle telecomunicazioni si usano tuttavia rappresentazioni più sintetiche della mappa illustrata, come ad es. quella della figura 5 di pagina 18, che ci mostra la **combinazione** del rumore galattico (in corrispondenza di contributo galattico minimo) e di assorbimento atmosferico, in funzione della frequenza, in termini di  $T_{SKY}$ , cioè di temperatura apparente del cielo. Le curve rappresentate dipendono dall'angolo  $\theta$  di puntamento dell'antenna rispetto alla verticale (complementare rispetto a quello di elevazione sull'orizzonte). Si osserva dalla figura che alle alte frequenze è più importante il contributo di rumore dovuto all'assorbimento atmosferico (da notare i due picchi di assorbimento a 22 GHz, dovuto alle molecole di acqua, e a 60 GHz, dovuto a quelle dell'ossigeno, come vedremo anche nell'ultima parte del Corso), mentre a frequenze più basse diventa più importante il rumore galattico.

Il rumore da assorbimento atmosferico dipende dalla quantità di atmosfera considerata, ed è dunque minimo per puntamento verticale ( $0^\circ$ ) e massimo per quello orizzontale ( $90^\circ$ ).

La diversificazione della componente di rumore dipendente dall'angolo di puntamento è piccola alle basse frequenze e si fa sentire alle alte frequenze, perché la componente di assorbimento atmosferico è più forte alle alte frequenze.

Si nota infatti che i contributi di rumore di assorbimento atmosferico e galattico hanno andamenti differenti al variare della frequenza: il rumore galattico aumenta al diminuire della frequenza, mentre il rumore da assorbimento atmosferico aumenta all'aumentare della frequenza. È importante considerare l'intervallo tra circa 1 GHz e 10 GHz, in cui il rumore complessivo è circa costante; questa finestra di frequenze è la banda in cui si ha in assoluto il rumore esterno minimo ed è dunque vantaggiosa per le telecomunicazioni.

Come già accennato, oltre al rumore proveniente dal cielo vi è poi il contributo di rumore del terreno, che può essere assimilato ad un corpo grigio; il rumore del terreno è composto da un contributo diretto di emissione termica e da un contributo di scattering, ovvero radiazioni “riflesse” dal terreno.

Il valore della temperatura di rumore del terreno è stimabile cautelativamente circa 290 K.

### Esercizio

Utilizzando le conoscenze acquisite, proviamo a effettuare una stima della temperatura di rumore di un'antenna che punta il cielo. Supponiamo di operare nella banda  $K_u$ . Utilizziamo la formula che suddivide la temperatura di antenna in una parte relativa al lobo principale ed una relativa ai lobi secondari:  $T_a = \eta_M T_{ML} + (1 - \eta_M) T_{SL}$ . Supponendo un angolo di elevazione del lobo principale dell'antenna  $\varphi = 30^\circ$  ( $\vartheta = 60^\circ$ ) e di lavorare a frequenza  $f_0 = 12 \text{ GHz}$ , dalla figura 5 si legge una temperatura apparente del cielo  $T_{SKY} = 10 \text{ K}$ . Supponendola costante all'interno del lobo principale d'antenna, nel contributo da lobo

principale  $T_{ML} = \frac{\int_{ml} T_{AP}(\vartheta, \varphi) F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{ml} F_n(\vartheta, \varphi) d\Omega}$  essa può essere portata fuori dall'integrale e

quindi otteniamo  $T_{ML} = 10 \text{ K}$ . Il contributo dei lobi secondari può essere diviso in parti uguali tra rumore del cielo e rumore del terreno, considerando che circa metà dei lobi

secondari puntano il cielo e circa metà il terreno, ottenendo la formula finale scomposta:

$$T_a = \eta_M \cdot 10 + \frac{1}{2}(1 - \eta_M) \cdot 290 + \frac{1}{2}(1 - \eta_M) \cdot 10 \quad K.$$

Considerando un valore realistico per l'efficienza del lobo principale, ad esempio  $\eta_M = 0,8$ , si ottiene un valore stimato  $T_a = 38 \text{ K}$ .

Si osservi come l'influenza del contributo relativo alla temperatura del terreno non sia trascurabile, per cui risulta importante, ai fini di avere temperature di antenna le più piccole possibili, utilizzare tipologie di antenna più complesse di quella ad es. a semplice riflettore, per le quali la parte dei lobi secondari che puntano il terreno sia la più ridotta possibile.