

CRITERI PER LA PROTEZIONE DA INTERFERENZE
ALLA RADIOASTRONOMIA

G. Tomassetti

Rapporto Interno IRA 226/96

CRITERI PER LA PROTEZIONE DA INTERFERENZE ALLA RADIOASTRONOMIA

G. Tomassetti

Introduzione

Un problema che si sta minacciosamente profilando all'orizzonte per la RADIOASTRONOMIA e le altre scienze che utilizzano istituzionalmente lo spettro radio delle onde E.M., e' il suo irreversibile INQUINAMENTO. Innumerevoli utenze e Servizi come la telefonia cellulare, la radio e telediffusione in superficie o via satellite, i gadget elettronici e gli stessi computers provocano inevitabilmente segnali spuri che, se non controllati attraverso una severa normativa, non tarderanno a rendere inutilizzabili i nostri impianti sempre piu' grandi e sofisticati e forse proprio per questo piu' vulnerabili.

Con questa nota si intende fare il punto della situazione ricordando al lettore come e chi e' preposto al corretto sviluppo e compatibile sfruttamento dello spettro radio e come e chi controlla e suggerisce la ottimizzazione della normativa tentando di allungare il piu' possibile nel tempo la sopravvivenza delle Istituzioni scientifiche che, per prime, risultano danneggiate da situazioni caotiche come, ad esempio, quella italiana.

Vengono infine ricordate ed applicate attraverso un esempio numerico concreto le risultanze del Rapporto CCIR 224, riconosciuto ed applicato in tutto il mondo che fissa i criteri ed i livelli di compatibilita' e quindi la "pacifica coesistenza" tra Servizi di telecomunicazione, e non come la Radioastronomia.

La Organizzazione Internazionale

Lo spettro radio di piu' facile e frequente utilizzo delle Onde Elettromagnetiche, e' finito ed il suo impiego e' regolamentato, a livello mondiale, attraverso Conferenze WARC (World Administrative Radio Conference) o piu' succintamente WRC (World Radiocommunication Conference) che hanno ampi poteri decisionali.

Nel passato, anche per ragioni politiche e guerre piu' o meno "fredde", tali Conferenze venivano convocate con scale di tempi di alcuni decenni. Ora si parla di una Conferenza ogni due anni ma ogni volta viene esaminato solo un piccolo settore dello spettro.

La organizzazione delle Conferenze WARC e la implementazione delle sue decisioni e' affidata ad un Organismo internazionale permanente con sede in Ginevra che si chiama ITU, la nota "International Telecommunications Union".

Il funzionamento della ITU dipende dai governi delle Nazioni membro che in pratica coprono tutta la Terra.

Le Nazioni europee sono associate anche e primariamente nella CEPT, la "Conference Europeene des Postes et des Telecommunications", organo consultivo della ITU. La ITU si avvale anche dal parere e dei consigli di altri Comitati e Organismi sia tecnici che amministrativi (CCIR, VGE, ERO, etc.): il suo problema ultimo e' quello di gestire in modo politicamente e "scientificamente" accettabile la suddivisione dello spettro radio a fronte di innumerevoli e contrastanti richieste provenienti dal Mondo intero.

Una delle critiche che questo tipo di gestione riceve, specie dal mondo accademico, e' quella di essere vistosamente orientata piu' verso gli interessi delle Telecomunicazioni, dei Servizi ATTIVI come dicono i radioastronomi, che verso quelli scientifici o comunque PASSIVI che si sono proposti negli ultimi decenni.

In verita' un primo riconoscimento del Servizio di Radioastronomia (SRA)

e della esistenza e validita' di sue importanti richieste di bande radio avvenne durante la Conferenza WARC del 1959. Proprio in quella circostanza vennero assegnate in esclusiva le bande dei 21 e 18 cm ove si ricevono le righe dell'Idrogeno e dell'Ossidrile OH. Venne inoltre riconosciuto che le bande radioastronomiche non doversero essere spaziate per piu' di una ottava.

Le bande assegnate alla scienza furono subito minacciate dagli interessi economici connessi al formidabile sviluppo delle telecomunicazioni e della diffusione Radio e Televisiva nel frattempo sopravvenute ed a cui era quasi inevitabilmente associato l'inquinamento di cui si e' detto in precedenza.

Per "difendersi" da interferenze provocate da Servizi attivi ma soprattutto per perorare la causa della Scienza presso le Organizzazioni decisionali (WARC ed ITU), sono nate negli anni alcuni Organismi "ad hoc" come lo IUCAF (Inter-Union Commission on Frequency Allocation for Radio Astronomy and Space Science), patrocinato tramite la ICSU (International Council of Scientific Unions), direttamente dall'UNESCO.

Sponsorizzatori dello IUCAF sono la:

- IAU, International Astronomical Union
- URSI, International Union of Radio Science
- COSPAR, Committee on Space Research

Afferiscono direttamente alla IUCAF, il CRAF (Committee for the Radio Astronomy Frequencies) in Europa ed il CORF (Commission on Radio Frequencies) in America.

La IUCAF partecipa alle riunioni della ITU ma non ha diritto di voto. L'Istituto di Radioastronomia (IRA) e' membro del CRAF ed un suo rappresentante (attualmente lo scrivente) partecipa regolarmente alle riunioni che avvengono di norma due volte all'anno, ospiti a turno degli Osservatori europei.

Una rappresentazione grafica a blocchi delle collocazioni relative dei vari Enti ed Organizzazioni internazionali citate e' mostrata in Fig. 1

I problemi della Radioastronomia italiana

L'Italia e' attualmente il Paese in Europa, ma probabilmente nel mondo, in cui piu' alto risulta il numero degli operatori economici che gestiscono emittenti private di radio-tele diffusione.

Il controllo amministrativo e tecnico della miriade di trasmettitori e ripetitori e' a carico della Amministrazione Statale soprattutto attraverso le sue strutture periferiche regionali, ora note come Uffici Circo-scrizionali (ex CIRCOSTEL). Purtroppo non sempre e non tutti i Circo-scrizionali sono all'altezza del compito delicatissimo e importante ad essi affidato: spesso risultano privi di strumentazione per effettuare i controlli ed altre volte sono carenti del personale specializzato necessario.

L'Amministrazione Centrale romana e' stata colta alla sprovvista dai nuovi problemi creati dal sovraffollamento e sembra aver perso contatto con il Paese e con la normativa internazionale.

L'ultima azione e' stata quella di tentare di far convivere sulla stessa banda dei 18 cm, la Radioastronomia, utente primaria e passiva, con ponti radio di trasferimento di radiodiffusione privata FM, con risultati che e' facile immaginare!

Questo procedere a tentoni crea frequenti contenziosi tra le giuste aspettative di una imprenditoria che vuole espandersi e quelle sacrosante degli scienziati che vogliono osservare il radio-cielo, come istituzionalmente previsto, senza doversi preoccupare costantemente di segnali di chiara origine terrestre.

La individuazione di segnali interferenti il Servizio di Radioastronomia come facilmente deducibile dalle precedenti affermazioni, e' divenuto un impegno improrogabile a carico dell'I.R.A. che impiega una consistente

(2)

frazione del suo budget alla gestione di tale indispensabile mansione con l'impiego, a tempo pieno, di alcune unita' di personale altamente specializzato e di un costoso furgone attrezzato. Individuata con opportune triangolazioni ed ispezioni in sito la emittente abusiva o non in regola tecnicamente (e.g. emissioni di armoniche o spurie sulle bande radioastronomiche), viene fatta denuncia ufficiale spesso con un telegramma, al locale Ufficio Circostrizionale che provvede alle verifiche ed agli adempimenti di legge per far cessare la turbativa. La procedura e' chiaramente troppo macchinosa e richiede tempi inaccettabilmente lunghi, specie quando il segnale interferente proviene da Regioni esterne all'Emilia-Romagna.

La normativa internazionale e la nota CCIR 224

Quando il segnale interferente e' tanto forte da impedire totalmente la osservazione radioastronomica e' facile inoltrare una denuncia e la verifica ufficiale da parte della Autorita' preposta ha esito scontato. I casi piu' subdoli si verificano quando la interferenza e' saltuaria oppure non macroscopicamente evidente.

E' necessario in molti casi rispondere ad un quesito fondamentale: quando un segnale spurio e' considerato una interferenza nociva ed a quale livello rispetto ad esempio a quello del segnale radioastronomico che si tenta di ricevere?

Bisogna insomma disporre di livelli di riferimento determinabili in modo univoco e accettati da tutti.

Una Commissione consultiva della ITU, la CCIR, ha approfondito l'argomento ed ha redatto la NOTA 224 (oggi nota ITU-R RA.769) corredata delle necessarie premesse teoriche e di Tabelle con dati numerici di riferimento. In pratica, per la costruzione delle Tabelle, si opera in questo modo:

- a- si determina la sensibilita' del sistema ricevente esprimendola ad esempio come Densita' di Potenza Spettrale (Watt/Hz). (Non sono considerate le caratteristiche dalla antenna in uso per rendere piu' generale il caso);
- b- si decide che un segnale interferente e' inaccettabile quando introduce un contributo superiore al 10 % del livello minimo detettabile dall'impianto radioastronomico (ΔT);
- c- si calcola di conseguenza il livello interferenziale "accettabile" espresso in potenza ricevuta sulla banda (Watt); in flusso (Watt/mq) o in potenza spettrale (Watt/(mq * Hz)) considerando come area efficace quella di un dipolo isotropico.

Vengono qui di seguito riportate le argomentazioni teoriche e le procedure di calcolo adottate dal CCIR. I dati tabellari sono stati ricalcolati dallo scrivente risultando attendibili ed aggiornati e se ne da riscontro per future e purtroppo prevedibili necessita' di uso.

Argomentazioni teoriche e verifiche della 224

La intensita' della radiazione misurata in radioastronomia ha una distribuzione di tipo gaussiano tale da risultare non distinguibile dal rumore generato dagli stessi radio ricevitori usati per rivelarla o da quello generato per effetto della radiazione termica della Terra e della sua atmosfera.

Inoltre, il livello di potenza ricevuto da una antenna, provocato dalla radiazione cosmica, e' di solito molto piu' debole di quello di fondo gia' presente nel sistema di ricezione.

Il rapporto tra i due livelli spesso supera i 30 dB e oltre.

In altri termini, il rapporto segnale/disturbo con cui il radioastronomo

ha a che fare e' di -30 dB o peggio: in casi estremi anche rapporti di -60 dB possono essere usati con successo dando luogo ad osservazioni ancora scientificamente valide.

Le osservazioni radioastronomiche, stando al CCIR, possono essere grossolanamente suddivise in due classi:

Classe A : sono quelle in cui la sensibilita' della strumentazione non costituisce fattore primario perche' i livelli delle radiosorgenti osservate sono di relativamente alta intensita' (emissione del Sole e Giove, scintillazioni ecc.). Le interferenze in questo tipo di osservazioni risultano di minor rilevanza e piu' facilmente individuabili e trattabili e di esse non ci si occupa in questo rapporto.

Classe B : sono quelle che richiedono la strumentazione piu' avanzata come i ricevitori criogenici, lunghe costanti di tempo di integrazione e bande passanti molto ampie. La affidabilita' e credibilita' scientifica di queste osservazioni dipende fortemente dalla sensibilita' e stabilita' della strumentazione utilizzata.

Sono queste osservazioni che piu' risentono della presenza di segnali indesiderati specie quando questi siano molto deboli.

Il modo piu' semplice per definire la sensibilita' osservativa in radioastronomia e' quello di conoscere, perche' misurata con alta confidenza, la variazione minima di potenza, o di temperatura equivalente, detettabile all'ingresso del radiometro.

Sensibilita' degli impianti radioastronomici

La potenza disponibile all'uscita del rivelatore del radiometro e' funzione della potenza totale presente all'ingresso del ricevitore, assumendo che il guadagno ed altri parametri, come la linearita' del sistema ricevente, rimangano invariati durante le osservazioni.

La potenza totale di ingresso consiste della somma della potenza utile del segnale radioastronomico -Ps- e di quella indesiderata dovuta al rumore proprio -Pn- provocato dalla temperatura -Ta- dell'antenna e -Tr- del ricevitore.

Potenze utile ed indesiderata, sono dovute a processi casuali che le rendono qualitativamente indistinguibili, come gia' accennato.

Ad entrambe e' pero' associabile, dopo i necessari processi di rivelazione ed integrazione, un livello d.c. Il segnale utile apparira' come una piccola variazione di questo livello rispetto al suo valor medio, che e' quasi costante, perche' proprio del sistema.

La media statistica di una variabile casuale stazionaria come la potenza di un rumore bianco -P- puo'essere calcolato con una PRECISIONE inversamente proporzionale alla radice quadra del numero degli eventi -N-, con una deviazione standard della stessa media pari a:

$$\Delta P \sim \frac{P}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

La deviazione standard ΔP e' anche nota come r.m.s. (root mean square). L'osservazione di un numero sufficientemente elevato di eventi -N- permette, in teoria, di migliorare entro ampi limiti la precisione di misura della potenza del radio-rumore.

Risulta pertanto ovvio che la condizione per ricevere segnali anche estremamente deboli sara' quella che permette di ridurre la fluttuazione

ΔP ad un livello inferiore a quella del segnale utile $-P_s-$.

In pratica si allarga la banda di ricezione in modo da considerare Δf eventi indipendenti (uno per Hz) utilizzabili dal radiometro e si estende la durata della osservazione agendo sul tempo di integrazione $-\tau-$ per aumentare il numero degli eventi $-N-$ su cui effettuare la media statistica.

Chiaramente ne' Δf ne' τ potranno essere scelti grandi a piacere perche' limitati, Δf dalla presenza di segnali interferenti presenti fuori dalla banda consentita e τ a causa della stabilita' finita della catena di ricezione.

Da quanto detto possiamo scrivere che:

$$N \approx (\Delta f * \tau) \quad (2)$$

Combinando con (1) si ottiene:

$$\frac{\Delta P}{P} \sim \frac{1}{\sqrt{\Delta f * \tau}} \quad (3)$$

che costituisce la relazione base per la radioastronomia

La (3) non e' pero' ancora una equazione ed il fattore di proporzionalita' necessario per renderla tale dipende dalla strumentazione usata nelle osservazioni. Per tenere conto della polarizzazione il Kraus suggerisce di moltiplicare per $1/\sqrt{2}$ che aggiorna la (3) come segue:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{2\Delta f * \tau}} \quad (4)$$

Come gia' detto, P e ΔP sono potenze di rumore ma la (4) e' valida anche se si considerano P e ΔP , DENSITA' SPETTRALI di rumore. Di conseguenza le fluttuazioni del rumore nella densita' spettrale e' relata alla sensibilita' complessiva di sistema espressa in unita' di temperatura attraverso la costante di Boltzmann $-k-$ secondo la relazione di Nyquist:

$$\Delta P = k \Delta T \quad \text{ovvero} \quad P = k T \quad (5)$$

La equazione della sensibilita' diventa cosi':

$$\Delta T = \frac{T_{sys}}{\sqrt{2\Delta f * \tau}} \quad (6)$$

$$\text{dove: } T_{\text{sys}} = T_a + T_r \quad (7)$$

T_a = temperatura d'antenna (fondo cosmico + atmosfera e radiazione terrestre)

T_r = temperatura di rumore del ricevitore

IL LIVELLO DI POTENZA INTERFERENTE CONSIDERATO NOCIVO ALLA OSSERVAZIONE RADIOASTRONOMICA E' QUELLO CHE INTRODUCE UN ERRORE DEL 10 % NELLA MISURA DI ΔP o ΔT .

In termini espliciti:

$$\underline{\Delta P_{\text{Ph}}} = 0,1 \Delta P \Delta f \quad (8)$$

Nelle allegate TABELLE I e II sono riportati i livelli di sensibilità e di nocività da interferenze per le più note bande radioastronomiche sia per le osservazioni nel continuo (I) che in riga (II) assumendo come bande passanti quelle assegnate dalle RADIO REGULATIONS internazionali nel caso I e quella relativa ad una velocità di 3 km/sec nel caso II. La costante di tempo di integrazione di 2000 sec è comune alle due Tabelle ma si accetti che costanti di tempo anche molto più lunghe sono comunemente usate specie nelle osservazioni in riga.

La Fig. 2 riporta graficamente i limiti posti alle interferenze come calcolati e riportati nelle colonne (9) delle Tabelle. La non uniformità dei tracciati è dovuto al fatto che le bande passanti sulle bande assegnate non sono costanti.

Le unità di misura utilizzate sono quelle suggerite dalla Raccomandazione CCIR 574 in cui:

$$\text{Power Flux Density} = S_h = \text{Watt/mq} = \text{Potenza/Area}$$

$$\text{Spectral Power Flux Density} = S_{sh} = \text{Watt}/(\text{mq} * \text{Hz})$$

$$\text{Spectral Power Density} = \Delta P \quad \text{Watt/Hz}$$

$$\text{Unità di Flusso in R.A.} = \underline{10E-26} \quad \text{Watt}/(\text{mq} * \text{Hz}) = \underline{1 \text{ Jy}}$$

$$\text{Area efficace del dipolo isotropico} = \lambda^2 / (4\pi) = c^2 / (4\pi f^2)$$

Nei calcoli qui riportati e come accennato in precedenza, la generalizzazione degli stessi implica il considerare solo antenne di riferimento isotrope. Il guadagno effettivo del lobo principale dell'antenna spesso non modifica in modo significativo le situazioni interferenziali locali che più spesso dipendono dalle risposte secondarie dell'antenna. Il livello dei lobi secondari diminuisce tipicamente con la distanza angolare, in gradi, dall'asse della risposta primaria secondo la relazione:

$$(32 - 25 \log \varphi) \text{ dBi}$$

(9)

$$\text{per } 1^\circ < \varphi < 48^\circ$$

Il livello di 0 dBi (come il riferimento di cui sopra), si verifica a 19° dal lobo principale per cui i livelli indicati nelle Tabelle risulterebbero validi per puntamenti superiori ai 19° dal lobo principale.

Esempio di calcolo della sensibilita' radioastronomica

Nell'intento di chiarire quanto detto in precedenza e di verificare i dati riportati nelle tabelle I e II, si procede ad un calcolo pratico su una banda molto usata, quella dei 21 cm, ampia, come e' noto, 27 MHz e su cui e' vietata ogni tipo di emissione, in tutto il mondo.

Di solito e' utile conoscere il livello di potenza COMPLESSIVO presente all'ingresso del preamplificatore d'antenna, spesso raffreddato, per avere subito l'ordine di grandezza del guadagno necessario in catena per rendere disponibile quel milliwatt di potenza, necessario per pilotare correttamente il rivelatore quadratico.

Tale potenza si ricava applicando la relazione:

$$P = k T_{\text{sys}} \Delta f \tag{10}$$

ponendo: $k =$ costante di Boltzmann $= 1.38E-23 \text{ J/k}$
 $T_{\text{sys}} = 30 \text{ k}$ (colonna 3 + 4 della Tabella I)
 $\Delta f = 27E+6 \text{ Hz}$

eseguendo, ottengo: $P = 1.12E-14 \text{ Watt}$

che, espresso in forma logaritmica, risulta:

$$P = -139.5 \text{ dBW}$$

o, in notazione piu' comune:

$$P = -109.5 \text{ dBm}$$

Riferendoci a quanto detto in precedenza si afferma subito che per ottenere un milliwatt ai capi del rivelatore quadratico sara' necessario prevedere un guadagno della catena di ricezione di circa 110 dB.

Ma questo livello di potenza, pur importante a conoscersi, non fornisce la sensibilita' dell'impianto radioastronomico determinabile invece applicando la relazione (6) precedente ove porremo:

$$T_{\text{sys}} = 30 \text{ k}$$
$$\Delta f = 27 \text{ MHz}$$
$$\tau = 2000 \text{ sec.}$$

Eseguendo il calcolo si ottiene:

$$\Delta T = 91E-6 \text{ k} \quad (\text{cfr. colonna 5, Tabella I})$$

Moltiplicando per la costante di Boltzman otteniamo la POTENZA SPETTRALE:

$$\Delta P = 1.25E-27 \text{ Watt/Hz}$$

che, espressa in forma logaritmica diviene:

$$\underline{\Delta P = -269 \text{ dB (Watt/Hz)}} \quad (\text{cfr. colonna 6, Tabella I})$$

che costituisce la "potenza spettrale di lavoro" sulla banda in oggetto.

SI NOTI CHE L'ANTENNA NON E' PARTE INTERESSATA AI CALCOLI se non per il rumore termico, T_a , da essa introdotto.

Un segnale interferente a larga banda, per non influenzare negativamente le osservazioni, dovrà risultare almeno 10 volte inferiore al livello calcolato (cfr. equazione (8)) e cioè:

$$\Delta P_h = 0.1 * 1.25E-27 * 27E+6 = 3.37E-21 \text{ Watt}$$

che, in forma logaritmica diventa:

$$\underline{\Delta P_h = -205 \text{ dBWatt}} \quad (\text{cfr. colonna 7, Tabella I})$$

Il FLUSSO corrispondente a questo livello si ottiene dividendolo per la superficie teorica di una antenna isotropa la cui area efficace, definita in precedenza, vale :

$$A_e = 0.21E+2 * 12.56E-1 = 35E-4 \text{ mq}$$

per cui:

$$S_h = 3.37E-21 * 35E+4 = 9.63E-19 \text{ W/mq}$$

che in forma logaritmica diventa:

$$\underline{S_h = -180 \text{ dB (Watt/mq)}} \quad (\text{cfr. colonna 8, Tabella I})$$

Per ottenere il FLUSSO SPETTRALE si dividerà per la banda in uso e cioè:

$$S_{sh} = 9.63E-19 * 27E-6 = 3.56E-26 \text{ Watt}/(\text{mq} * \text{Hz})$$

che in forma logaritmica diventa:

$$\underline{S_{sh} = -255 \text{ dB (Watt}/(\text{mq} * \text{Hz}))} \quad (\text{cfr. colonna 9, Tabella I})$$

Con questo dato numerico si completa la positiva verifica della Tabella I. Non si ritiene utile procedere in modo analogo con la Tabella II che consideriamo corretta.

Per avere un ordine di grandezza del minimo flusso detettabile dal nostro impianto in esame quando ad esso venga collegata una ANTENNA di area efficace nota (e.g. paraboloide di Medicina = 800 mq), conoscendo la potenza spettrale già calcolata sarà sufficiente eseguire:

$$Sh = \text{Potenza spettrale}/\text{Area}$$

$$Sh = 1.25E-27 * 800E-1 \text{ W}/(\text{mq} * \text{Hz})$$

$$Sh = 1.56E-30 \text{ W}/(\text{mq} * \text{Hz})$$

che in forma logaritmica diventa:

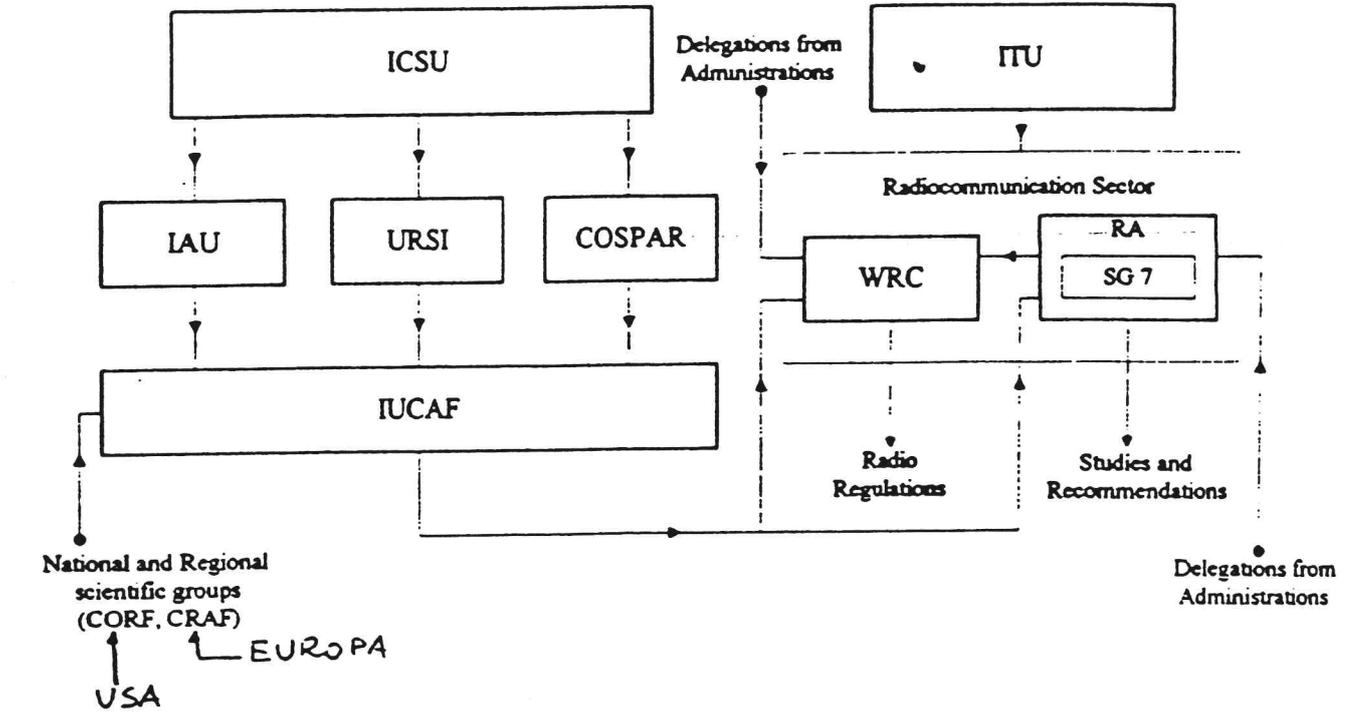
$$\underline{\underline{Sh = -298 \text{ dB (Watt}/(\text{mq} * \text{Hz}))}}$$

Ricordando che una unità di flusso (1 Jy) vale $10E-26 \text{ Watt}/(\text{mq} * \text{Hz})$ si verifica che al livello precedente corrisponde un flusso detettabile di:

$$\underline{\underline{1.56E-4 \text{ Jy.}}}$$

FIGURE 1

Inter-relationships between international agencies involved in frequency coordination for the radio astronomy service



where (in alphabetical order):

- | | |
|--------|--|
| CORF | Committee on Radio Frequencies |
| COSPAR | Committee on Space Research |
| CRAF | Committee on Radio Astronomical Frequencies |
| IAU | International Astronomical Union |
| ICSU | International Council of Scientific Unions |
| ITU | International Telecommunication Union |
| IUCAF | Inter-Union Commission for the Allocation of Frequencies for Radio Astronomy and Space Science |
| RA | Radiocommunication Assembly |
| SG 7 | Study Group 7 |
| URSI | International Union of Radio Science |
| WRC | World Radiocommunication Conference |

FIG. 2

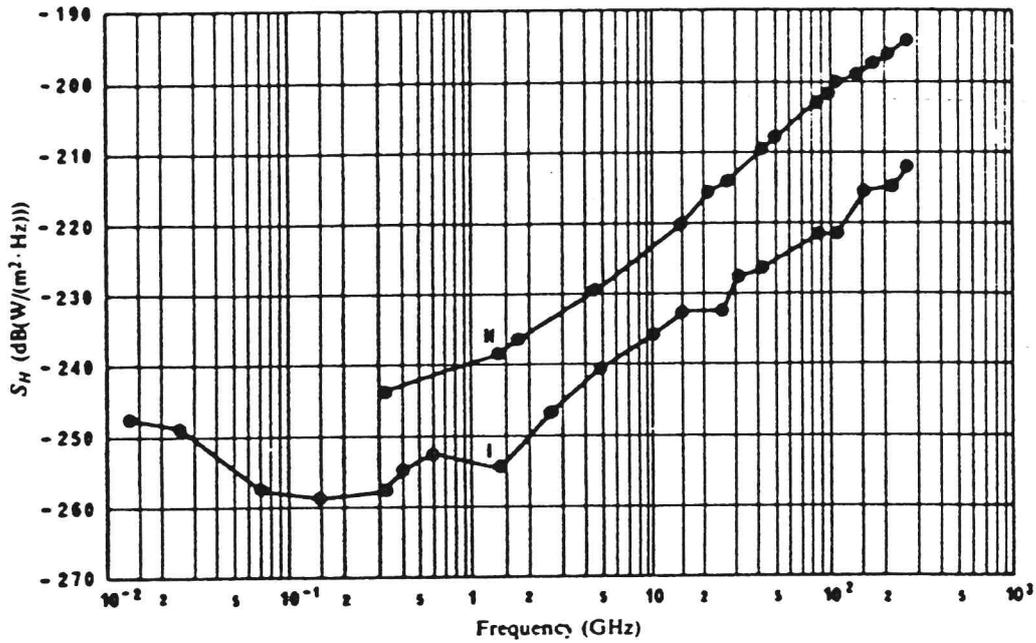


FIGURE 1 - Harmful interference limits versus frequency as expressed in Tables I and II for $t = 2000$ s

I: Continuum

II: Line

The calculated sensitivities and harmful interference levels presented in Tables I and II are based on assumed integration times of 2000 s. Integration times actually used in astronomical observations cover a wide range of values. Continuum observations made with telescopes operating singly (rather than in interferometric arrays) are reasonably well represented by the integration time of 2000 s. It is representative of good quality observations although there are many occasions when this time is exceeded by an order of magnitude. On the other hand 2000 s is less representative of spectral line observations. Improvements in receiver stability and the increased use of correlation spectrometers have resulted in the more frequent use of longer integration times. Spectral line observations lasting several hours are now quite common. A more representative value would be 10 hours with a consequent improvement in sensitivity of 6 dB over that now shown in Table II.

TABLE 1 - Sensitivities and harmful interference levels for radioastronomy continuum observations with 2000 s integration time

Centre frequency (°) f_c (MHz)	Assumed bandwidth Δf (MHz)	Minimum antenna noise temperature T_A (K)	Receiver noise temperature T_R (K)	System sensitivity (noise fluctuations)		Harmful interference levels		
				Temperature ΔT (mK)	Power spectral density ΔP (dB(W/Hz))	Input power ΔP_{in} (dBW)	Power flux-density $S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	Spectral power flux-density S_H (dB(W/m ² ·Hz))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13.385	0.05	60000	100	4250	-222	-185	-201	-248
25.610	0.120	20000	100	917	-229	-188	-199	-249
73.8	1.6	10000	100	14	-247	-195	-196	-258
151.525	2.95	200	100	2.76	-254	-199	-194	-259
325.3	6.6	40	100	0.86	-259	-201	-189	-258
408.05	3.9	25	100	1.00	-259	-203	-189	-255
611	6.0	15	100	0.74	-260	-202	-185	-253
1413.5	27	10	20	0.091	-269	-205	-180	-255
2695	10	10	20	0.15	-267	-207	-177	-247
4995	10	10	20	0.15	-267	-207	-171	-241
10650	100	12	20	0.05	-272	-202	-160	-240
15375	50	15	30	0.10	-269	-202	-156	-233
23800	400	15	50	0.051	-271	-195	-147	-233
31550	500	18	100	0.083	-269	-192	-141	-228
43000	1000	25	100	0.063	-271	-191	-137	-227
89000	6000	30	150	0.037	-273	-185	-125	-222
110500	11000	40	150	0.029	-274	-184	-121	-222
166000	4000	40	150	0.048	-272	-186	-120	-216
224000	14000	40	200	0.032	-274	-182	-114	-215
270000	10000	40	200	0.038	-273	-183	-113	-213

(°) Calculation of harmful interference levels is based on the centre frequency shown in this column although not all regions have the same allocations.

Note. - If an integration time of 15 minutes, one hour, two hours, five hours or ten hours is used, the relevant values in the Table should be varied by +1.7, -1.3, -2.8, -4.8 or -6.3 dB respectively.

TABLE II — Sensitivities and harmful interference levels for radioastronomy spectral line observations* with 2000 s integration

Frequency f (MHz)	Assumed spectral line channel bandwidth Δf (kHz)	Minimum noise antenna temperature T_A (K)	Receiver noise temperature T_R (K)	System sensitivity (noise fluctuations)		Harmful interference levels		
				Temperature ΔT (mK)	Power spectral density ΔP (dB(W/Hz))	Input power ΔP_H (dBW)	Power flux-density $S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	Spectral power flux-density S_H (dB(W/(m ² ·Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
327	10	40	100	22.1	- 245	- 215	- 204	- 244
1420	20	10	20	3.35	- 253	- 220	- 196	- 239
1665	20	10	20	3.35	- 253	- 220	- 194	- 237
4830	50	10	20	2.12	- 255	- 218	- 183	- 230
14 500	150	15	30	1.84	- 256	- 214	- 169	- 221
22 200	250	40	50	2.85	- 254	- 210	- 162	- 216
23 700	250	40	50	2.85	- 254	- 210	- 161	- 215
43 000	500	25	100	2.80	- 254	- 207	- 153	- 210
48 000	500	30	100	2.91	- 254	- 207	- 152	- 209
88 600	1 000	30	150	2.85	- 254	- 204	- 144	- 204
98 000	1 000	40	150	3.00	- 254	- 204	- 141	- 203
115 000	1 000	50	150	3.16	- 254	- 204	- 141	- 201
140 000	1 500	40	150	2.45	- 255	- 201	- 139	- 200
178 000	1 500	40	150	2.45	- 255	- 201	- 136	- 198
220 000	2 500	40	200	2.40	- 255	- 201	- 133	- 197
265 000	2 500	40	200	2.40	- 255	- 201	- 131	- 195

* This Table is not intended to give a complete list of spectral-line bands, but only representative examples throughout the spectrum.

Note. — If an integration time of 15 minutes, one hour, two hours, five hours or ten hours is used, the relevant values in the Table should be changed by + 1.7, - 1.3, - 2.8, - 4.8 or - 6.3 dB, respectively.

A L L E G A T O 1

Elenco delle bande radioastronomiche in uso o
di cui e' previsto l'uso nei radiotelescopi
italiani

ELENCO DELLE BANDE ASSEGNATE AL SRA DAL PNRF 1983

406.1	-	410.0	MHz	10.68	-	10.70	GHz
608.0	-	614.0	MHz	15.35	-	15.40	GHz
1400.0	-	1427.0	MHz	22.21	-	22.50	GHz
1660.0	-	1670.0	MHz	23.60	-	24.00	GHz
2690.0	-	2700.0	MHz	31.30	-	31.80	GHz

ELENCO DELLE BANDE "ASSEGNABILI" AL SRA COME NOTA A PIE' PAGINA DEL PNRF 1983 E DI PROBABILE ASSEGNAZIONE COL NUOVO PNRF

37.500	-	38.250	MHz	3.260	-	3.2670	GHz
150.05	-	153.00	MHz	3.332	-	3.3390	GHz
322.00	-	328.50	MHz	3.3458	-	3.3525	GHz
1330.0	-	1400.0	MHz	4.8000	-	5.0000	GHz
1610,6	-	1613.8	MHz	14.470	-	14.500	GHz
1718.8	-	1722.2	MHz	22.010	-	22.210	GHz
				22.810	-	22.860	GHz
				23.070	-	23.120	GHz

ELENCO DELLE BANDE EFFETTIVAMENTE USATE A MEDICINA E NOTO AL 1mo GENNAIO 1996

322.0 - 328.5	MHz	Riga Deuterio e continuo
406.1 - 410.0	MHz	Pulsar e continuo
1400.0 - 1427.0	MHz	Riga Idrogeno e VLBI. Vietata in tutto il Mondo ogni emissione terrestre.
1610.6 - 1613.8	MHz	Riga radicale OH e continuo
1622.0 - 1702.0	MHz	Comprende il settore <u>1660-1670</u> MHz ove si ricevono due righe di emissione del radicale OH. Molto usata per VLBI.
1715.0 - 1725.0	MHz	Riga radicale OH
2200.0 - 2360.0	MHz	VLBI Geodinamico e continuo astrofisico.
4.800 - 5.000	GHz	Riga H ₂ CO (formaldeide) e VLBI
8.180 - 8.580	GHz	VLBI Geodinamico e continuo astrofisico
14.47 - 14.50	GHz	Riga H ₂ CO e continuo
15.35 - 15.40	GHz	continuo VLBI
22.21 - 22.50	GHz	Riga radicale OH, MASER e continuo
22.50 - 22.99	GHz	continuo
23.60 - 24.00	GHz	Righe NH ₃ (ammoniaca)
41.00 - 45.00	GHz	Righe SiO (ossido di silicio) e continuo

Si NOTIFICA inoltre l'USO delle seguenti bande scientificamente molto importanti ma non previste nelle RADIO REGULATIONS:

6.00 - 6.10	GHz	Riga OH in MASER galattici
6.64 - 6.69	GHz	Riga CH ₃ OH (metanolo)
12.03 - 12.33	GHz	Riga H ₂ CO (formaldeide)

L'OSSERVATORIO di MATERA opera attualmente come terminale di VLBI GEODINAMICO sulle bande S/X e cioe' le citate:

2200 - 2360	MHz
8180 - 8580	MHz

ma ne previsto a breve il completo impiego RADIOASTRONOMICO con uso delle stesse bande di Medicina e Noto.

L'Osservatorio di TRIESTE opera su tutte le bande radioastronomiche di Medicina e Noto ma solo fino al limite superiore di circa 3 GHz.

Viene usata da oltre un ventennio anche una banda di 1 MHz centrata a 237 MHz.

E' prevista la costruzione di un Osservatorio R.A. in Sardegna.

A L L E G A T O 2

Calcolo per verificare la possibile interferenza
al satellite giapponese VSOP per VLBI spaziale da
parte di emittenti di radiodiffusione italiane
autorizzate sulla banda dei 18 cm.

CALCOLO PER POSSIBILI INTERFERENZE SUI 18cm AL VSOP
da parte di emittenti commerciali italiane
autorizzate dal Ministero P.T.

Il satellite giapponese VSOP per osservazioni spaziali VLBI, opererà anche sulla banda 1660-1670 MHz in cui il Ministero P.T. italiano sta autorizzando trasmissioni da parte di ripetitori di radiodiffusione commerciale.

Il satellite all'apogeo disterà dalla Terra 22000 km ed al perigeo solo 1000. La temperatura di sistema sui 18 cm sarà di circa 100 k, la banda passante di 16 o 32 MHz con una "estimated coherence time" di 650 sec che permetterà tempi di integrazione di alcune decine di secondi o più.
Ci si chiede se alcuna delle emittenti italiane autorizzate non possa interferire le osservazioni radioastronomiche.

Si assuma che la potenza trasmessa da una delle emittenti sia:

$$P_t = 1 \text{ Watt}$$

irradiati da una antenna ISOTROPICA di guadagno unitario e di Area efficace:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} = 0.18^2 / 12.56 = 26E-4 \text{ mq}$$

Alla distanza media R di 10000 km = 10E+7 m si avrà un FLUSSO, F, pari a:

$$F = P_t / (4\pi R^2) = 1 / (12.56 * 10E+14)$$

$$F = 7.96E-16 \text{ Watt/mq}$$

La potenza ricevuta dal VSOP, considerandolo utilizzare una antenna isotropica di guadagno unitario e di area efficace A_e come sopra, sarà:

$$W_r = \text{Flusso} * \text{Area efficace}$$

$$W_r = 7.96E-16 * 26E-4 = 207E-20 \text{ Watt}$$

che, espresso in termini logaritmici diventa:

$$\underline{W_r = -146.8 \text{ dBm}}$$

Questa potenza di segnale ricevibile dal VSOP va confrontata con quella del rumore del ricevitore che nella circostanza prevediamo predisposto per operazioni in riga (radicale OH) con una banda passante di 100 KHz ed una costante di tempo di integrazione di 10 sec.

La Temperatura minima T_{min} dettabile dal ricevitore VSOP vale:

$$T_{min} = T_{sys} / \sqrt{2\Delta f \tau}$$

$$T_{min} = 100 / \sqrt{2 * 10 * 10E+5} = \underline{0.071 \text{ k}}$$

La potenza elettrica equivalente si ottiene moltiplicando per la costante di Boltzmann ottenendo:

$$W_{min} = 1.38E-23 * 71E-3 * 10E+5$$

$$W_{min} = 9.80E-20 \text{ Watt}$$

che, in unità logaritmiche diventa:

$$\underline{W_{min} = -160 \text{ dBm}}$$

Il rapporto segnale/disturbo risulta così di +13.2 dB, quindi il segnale da 1 Watt irradiato da terra PUO' impedire totalmente le osservazioni in riga del VSOP sui 18 cm.

C'è solo da augurarsi che l'area efficace equivalente del satellite visto da

terra risulti trascurabile rispetto a quella calcolata.

In altri termini, e' molto auspicabile che i lobi secondari e altre risposte spurie del VSOP siano veramente molto basse altrimenti non sara' evitabile la interferenza delle decine di emittenti italiane che operano sulla stessa banda.

A L L E G A T O 3

Calcolo su di una tratta di oltre 200 km in previsione
di possibili interferenze all'Osservatorio di Medicina
da parte di emittenti di radiodiffusione autorizzate
sulla banda dei 18 cm.

STAZIONE RADIOASTRONOMICA DI MEDICINA (BO). Analisi di alcuni dati tecnici relativi ad una delle bande di esercizio.

Banda radioastronomica dei 18 cm (1660 - 1670 MHz). Fanno parte di questa banda anche la (1610.6 - 1613.8 MHz) e (1715 - 1725 MHz)

ANTENNA : paraboloide di 32 m di diametro;

ILLUMINAZIONE : a fuoco Cassegrain o primario (sui 18 cm e alcune altre bande);

POLARIZZAZIONE : circolare sinistra e/o destra con due canali distinti;

PUNTAMENTO : "azimut/elevation" con inseguimento automatico del radio-
cielo; elevazione minima: 1 grado sull'orizzonte. Possibilita' di puntamento manuale con una risoluzione di un millesimo di grado.

RICEVITORE : il preamplificatore d'antenna usa GaAs FET del tipo HEMT (high electron mobility transistor) non raffreddati su questa banda con una TEMPERATURA DI RUMORE di circa 40 Kelvin (circa 0.5 dB di cifra di rumore). Il guadagno del ricevitore e' quello necessario a far funzionare correttamente i dispositivi di acquisizione dei dati ma non costituisce un parametro rilevante.

BANDA PASSANTE : e' fissata in I.F. Normalmente si usano 2 MHz. Puo' essere cambiata a piacere e spostata come frequenza centrale per coprire tutta la banda d'ingresso;

TEMPERATURA DI SISTEMA : e' la temperatura effettiva di rumore in ingresso, somma di quella del ricevitore e di quella d'antenna che si valuta in circa 10 Kelvin.
Completivamente la T_{sys} vale dunque $40+10=50$ K

FATTORE DI MERITO (G/T) : 35 dB/K

ANTENNA RICEVENTE DI MEDICINA

E' costituita da un paraboloide di 32 m di diametro con illuminazione sia in fuoco primario che Cassegrain. Sui 18 cm, banda a cui si riferiscono queste note, opera in fuoco primario e polarizzazione CIRCOLARE sinistra e/o destra.

Calcolo della DIRETTIVITA' e GUADAGNO.

Direttivita' (D) e Guadagno (G) a meta' potenza, in questa circostanza in cui non vengono considerate le risposte secondarie dell'antenna (lobi secondari), possono essere tra loro convenientemente assimilati ed espressi dallo stesso numero.

Per definizione la Direttivita' e' data dal rapporto tra l'angolo solido di una sfera unitaria che vale circa 41200 gradi quadrati e quello del fascio (o lobo) principale dell'antenna in esame.

Per calcolare l'angolo solido "A" del fascio d'antenna ho bisogno di conoscere il suo fascio "F" sul piano. Si ha:

$$F = 1.2 * (\text{lunghezza d'onda/diam. antenna})$$

$$F = 1.2 * 0.18/32 = 0.00675 \text{ radianti}$$

$$= 0.00675 * 60 = \underline{0.4 \text{ gradi}}$$

L'angolo solido A di tale fascio, assumendo una simmetria circolare, vale:

$$A = 0.4 * 0.4 = 0.16 \text{ gradi quadrati}$$

La DIRETTIVITA' (= GUADAGNO isotropo) vale quindi:

$$\underline{D = G = 41200 / 0.16 = 257500 = 54 \text{ dBi}}$$

Per tenere conto, almeno in parte, del disaccoppiamento tra le polarizzazioni di possibili emittenti di radiodiffusione da ricevere e del nostro illuminatore, assumiamo come guadagno del fascio primario il valore:

$$\underline{G = 52 \text{ dBi}}$$

CALCOLI DELLA SENSIBILITA' DELL'IMPIANTO

Il ricevitore della banda 18 cm e' direttamente collegato all'illuminatore sul fuoco primario del paraboloide. La temperatura di rumore del sistema ricevente e' di 50 gradi Kelvin. La banda passante e' fissata in 2 MHz.

E' possibile calcolare la potenza del rumore presente all'ingresso del ricevitore applicando la relazione di Nyquist:

$$\underline{W_{in} = k T B}$$

dove: k = costante di Boltzmann = $1.38 * 10E-23$ (J/k)
 T = temperatura di operazione (Kelvin)
 B = banda passante in uso (Hz)

Sostituendo si ha:

$$\begin{aligned} W_{in} &= 1.38 * 10E-23 * 50 * 2 * 10E+6 = \\ &= 138 * 10E-17 \text{ Watt} = \\ &= \underline{- 118.6 \text{ dBm}} \end{aligned}$$

Avessimo utilizzato quale media frequenza un ricevitore commerciale con banda adattata pari alla deviazione in frequenza del segnale da ricevere (esempio: 200 KHz per FM), la potenza del rumore d'ingresso sarebbe risultata dieci volte inferiore e cioe' pari a:

$$\underline{- 128.6 \text{ dBm}}$$

Queste sono le due soglie del rumore d'ingresso del ricevitore nei casi di rivelazione di un segnale radioastronomico e di uno per telecomunicazioni.

Il ricevitore radioastronomico differisce da quello per telecomunicazioni essenzialmente per il diverso "trattamento" del segnale dopo la rivelazione.

Per estrarre e massimizzare l'informazione radioastronomica, il segnale ricevuto subisce un processo di integrazione con costanti di tempo variabili, a seconda del tipo di osservazione, da alcuni secondi a diverse ore.

A causa di tale processo di somma, il rumore del canale ricevente da luogo ad un livello d.c. costante che puo' essere agevolmente azzerato con una controtensione rispetto alla quale si possono evidenziare e amplificare le "variazioni" provocate dalle radiosorgenti.

La minima VARIAZIONE di potenza (o di temperatura), ricevibile nella direzione di puntamento della antenna rappresenta quindi la SENSIBILITA' del nostro impianto radioastronomico.

La temperatura minima rilevabile si calcola con la fondamentale relazione per la radioastronomia:

$$T_{min} = T_{sys} / \sqrt{(B * t)}$$

Con t si fa riferimento alla costante di tempo di integrazione in secondi

che, per questo esempio, fissiamo al valore di 10, tenendo presente che sono possibili e spesso utilizzati valori molto piu'alti. Nel nostro caso si ha;

$$T_{min} = 50 / \sqrt{(2 * 10E+6 * 10)}$$

Risolvendo otteniamo:

$$\underline{T_{min} = 0.011 \text{ Kelvin}}$$

a cui, applicando ancora la relazione di Nyquist, corrisponde una variazione equivalente di potenza elettrica:

$$W_{min} = 1.38 * 10E-23 * 0.011 * 2 * 10E+6$$

$$W_{min} = 3 * 10E-19$$

$$\underline{W_{min} = -155.2 \text{ dBm}}$$

Questo e' dunque il livello minimo di potenza ricevibile dall'antenna ed a cui l'impianto radioastronomico e' sensibile. Il livello di segnali estranei, per quanto indicato sul "CCIR report 224", dovrebbe sempre risultare di almeno 10 volte ad esso inferiore.

Si noti che la potenza di rumore presente all'ingresso del ricevitore radioastronomico era di -118.6 dBm, ben 36.6 dB piu' elevato!

Imponendo una costante di tempo di 1 ora, usata in alcune osservazioni, si otterrebbe un ulteriore miglioramento della "sensibilita'" di oltre 12 dB.

ATTENUAZIONE DI TRATTA TRA MILANO-NORD E MEDICINA (BO)

Essendo la tratta in parola di circa 200 km risulta implicita una propagazione per DIFFUSIONE TROPOSFERICA valutabile in termini concreti, ancorche' medi e per condizioni climatiche standard, con il metodo di Yeh (vedi RODA "Troposcatter Radio Links").

Si osservi pero' che il metodo di calcolo riguarda gli installatori di ponti radio che debbono funzionare con sicurezza per almeno il 50% del tempo e quindi, dal nostro punto di vista, risultano pessimistici. Infatti alle nostre latitudini l'attenuazione di tratta effettiva risulta sensibilmente inferiore a quella risultante da calcolo, specie in estate e/o in condizioni di bel tempo.

In condizioni particolari ma non infrequenti (inversioni termiche, super-rifrazione), tale discrepanza puo' superare le DECINE di dB.

a) calcolo della attenuazione "spazio libero" , L1:

$$L1 = 20 \log f \text{ (MHz)} + 20 \log d \text{ (km)} + 32.45$$

$$L1 = 20 \log 1665 + 20 \log 200 + 32.45 = \underline{142.9 \text{ dB}}$$

b) calcolo della attenuazione addizionale dovuta alla diffusione, L2:

$$L2 = 10 (Z-1) + 10 \log f/400 + 57$$

$$Z = \text{angolo di diffusione} = (180/3.14) * d/R = 1.35 \text{ gradi}$$

$$(d = 200 \text{ km} ; R = \text{raggio "radio" della Terra} = 8500 \text{ km})$$

$$L2 = 10 (0.35) + 10 \log 1665/400 + 57 = \underline{66.7 \text{ dB}}$$

c) correzione refrattivita':

$$\text{in atmosfera media assumiamo circa} = \underline{-2 \text{ dB}}$$

La attenuazione complessiva, in condizioni medie di diffusione tropo sulla tratta considerata, vale pertanto:

$$L = 142.9 + 66.7 - 2 = \underline{207.6 \text{ dB}}$$

CONFRONTO TRA LIVELLI DI POTENZA

Per verificare la plausibilita' che un segnale di radiodiffusione irradiato dalla zona di Milano, a 200 km dall'Osservatorio di Medicina, possa risultare inaccettabilmente dannoso per la ricerca radioastronomica effettuata sulla banda (1660-1670) MHz, assumiamo come riferimento una emittente campione che operi con le seguenti caratteristiche tecniche:

- a) - potenza del trasmettitore (che supponiamo non modulato per semplicita'):

$$P_t = 10 \text{ W} = + 40 \text{ dBm}$$

- b) - nessun guadagno dell'antenna trasmittente:

$$G_t = 0 \text{ dB}$$

La potenza ricevuta a Medicina sara' data da:

$$P_r = P_t \text{ (dBm)} + G_t \text{ (dB)} - G_r \text{ (dB)} - L \text{ (dB)}$$

dove:

P_t = potenza trasmessa a Milano
 G_t = guadagno dell'antenna trasmittente
 G_r = guadagno dell'antenna ricevente a Medicina
 L = attenuazione della tratta di 200 km

Tutte le grandezze sono ora note per cui otteniamo:

$$P_r = 40 + 0 + 52 - 207.6 = \underline{\underline{- 115.6 \text{ dBm}}}$$

Questo livello di segnale risulta superare di 3 dB il rumore di fondo del ricevitore radioastronomico (anche non usando processi di integrazione), supera di 13 dB quello di un ricevitore per telecomunicazioni con banda adattata e di ben

$$\underline{\underline{39.6 \text{ dB}}}$$

quello di un ricevitore radioastronomico con 10 sec di tempo di integrazione.