

# Il radar meteorico

IARA, SdR RadioAstronomia UAI, Astronomia Valli del Noce, Società Italiana di Fisica, IMO

## Abstract

Viene innanzitutto considerata la regione dello spettro elettromagnetico analizzata dal radar: le onde radio e in particolare la banda VHF. I radar attraverso cui si osservano gli sciami meteorici possono essere di due tipi: a back-scatter e a forward-scatter.

Meteorite, bolide, meteoriti rivestono un grande fascino e, se investigati con le tecniche della scienza contemporanea, possono dare informazioni cruciali sulla struttura dinamica, la storia e l'origine del nostro Sistema Solare. Sono anche fenomeni che, diversamente dagli impatti catastrofici (e per fortuna!), a ciascuno di noi capita prima o poi di osservare in prima persona, in una notte serena oppure durante una visita a un museo di storia naturale. Capirli dal punto di vista scientifico non toglie certamente nulla al godimento estetico (e neppure, nei casi estremi, al timore) che essi possono suscitare.

Paolo Farinella

## La finestra radar

Generalmente lo studio delle onde elettromagnetiche può essere affrontato da due diversi punti di vista: attraverso la teoria ondulatoria oppure con quella quantistica. I parametri fondamentali che descrivono le onde elettromagnetiche sono la lunghezza d'onda  $\lambda$ , la frequenza  $\nu$  e l'energia associata  $E$ , legate fra loro dalle seguenti relazioni:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

$$E = h \cdot \nu$$

dove  $c$  è la velocità della luce che nel vuoto vale circa  $3 \cdot 10^8$  m/s, mentre in un mezzo generico assume il

valore  $c_{mezzo} = \frac{c}{n}$ , dipendente dall'indice di rifrazione

del mezzo stesso  $n$ ;  $h$  è la costante di Planck il cui valore è circa  $6.6 \cdot 10^{-34}$  J·s.

La distribuzione delle energie di radiazione può essere rappresentata sia in funzione della lunghezza d'onda che della frequenza in un grafico noto come spettro elettromagnetico.

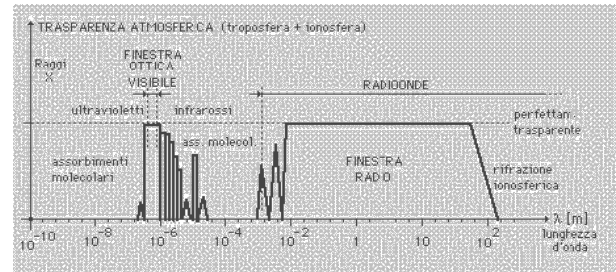


Figura 1 - La trasparenza atmosferica (troposfera e ionosfera) alle varie lunghezze d'onda.

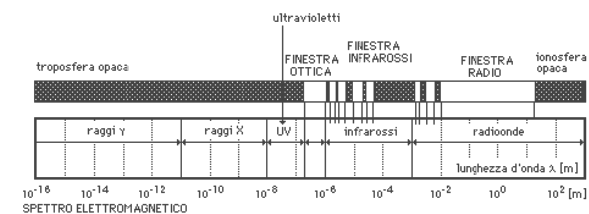


Figura 2 - Visione d'insieme dello spettro elettromagnetico in base alla lunghezza d'onda.

Tale spettro è stato arbitrariamente suddiviso in regioni o intervalli cui sono stati attribuiti nomi descrittivi. All'estremo più energetico (alte frequenze, piccole lunghezze d'onda) ci sono i raggi gamma e i raggi X (le cui lunghezze d'onda sono usualmente misurate in angstroms [Å] dove  $1 \text{ Å} = 10^{-10}$  m). La radiazione ultravioletta si estende da circa 300 Å a circa 4000 Å. Per le regioni centrali dello spettro è invece più opportuno utilizzare il micron ( $\mu\text{m}$ ) come unità di misura. La regione visibile occupa quindi l'intervallo fra 0.4 e 0.7  $\mu\text{m}$  o quello equivalente da 4000 a 7000 Å; quella infrarossa è invece compresa fra 0.7 e 100  $\mu\text{m}$ . Per gli intervalli di lunghezze d'onda maggiori si passa dai mm ai metri e tale regione corrisponde alle bande radio.

Tabella 1 - Suddivisione dello spettro radio in varie sottoclassi.

DENOMINAZIONE	SIG LA	FREQUE NZA	LUNGHE ZZA D'ONDA
FREQUENZE ESTREMAMENTE BASSE	ELF	0 - 3kHz	> 100Km
FREQUENZE BASSISSIME	VLF	3 - 30kHz	100 - 10Km
RADIOFREQUENZE BASSE	LF	30 - 300kHz	10 - 1Km

	(ONDE LUNGHE)			
	MEDIE FREQUENZE (ONDE MEDIE)	MF	300kHz - 3MHz	1Km - 100m
	ALTE FREQUENZE	HF	3 - 30MHz	100 - 10m
	FREQUENZE ALTISSIME (ONDE METRICHE)	VHF	30 - 300MHz	10 - 1m
MICROONDE	ONDE DECIMETRICHE	UHF	300MHz - 3GHz	1m - 10cm
	ONDE CENTIMETRICHE	SHF	3 - 30GHz	10 - 1cm
	ONDE MILLIMETRICHE	EHF	30 - 300GHz	1cm - 1mm

Le frequenze che possono essere utilizzate dal radar sono comprese generalmente in un intervallo che va da 3 MHz a 300 GHz. La determinazione di tale intervallo è limitata da alcuni problemi di carattere tecnologico ed altri legati alla natura del mezzo in cui si propagano le onde. Il ricorso alle frequenze più basse dell'intervallo, infatti, è limitato essenzialmente dall'ingombro delle strutture radianti. Ad esempio ad 1 MHz un dipolo di mezza lunghezza d'onda avrebbe delle dimensioni di 75 m, rendendo impossibile la costruzione di antenne ad alto guadagno. Inoltre, la ionosfera è un forte diffusore di basse frequenze e dà origine ad echi indesiderati; poiché la ionosfera non è un mezzo statico, questi si possono confondere con bersagli in movimento. Inoltre, elevate lunghezze d'onda comportano piccole variazioni in frequenza difficili da misurare se il segnale viene diffuso da un oggetto in movimento (effetto Doppler). Infine, si devono ricordare molti problemi logistici, quali le difficoltà nell'ottenere una licenza di trasmissione ed il reperimento di un canale radio libero adatto. Il fondo, in aggiunta, presenta livelli di rumore generalmente alti. Alle frequenze più alte, invece, i problemi sono di norma connessi con l'assorbimento di energia da parte degli strati atmosferici, anche se esistono varie bande dove l'assorbimento atmosferico è meno accentuato, come a 35 GHz e vicino a 94 GHz.

La scelta della frequenza da utilizzare nella ricerca radar deve soddisfare principalmente due requisiti:

1. si devono utilizzare frequenze basse in quanto la potenza ricevuta dipende dal quadrato della lunghezza d'onda a meno della sezione d'urto radar dipendente anch'essa dalla lunghezza d'onda, mentre il rumore cresce col quadrato della stessa;
2. non è consigliabile scendere sotto i 30 MHz per non incorrere, come già detto, nei forti disturbi provocati dalla propagazione ionosferica.

Una frequenza intorno ai 40 MHz soddisfa pienamente le condizioni richieste.

### Il radar

Il radar utilizza onde radio per rilevare la presenza di oggetti e per trovare la loro posizione. La parola radar, per la prima volta usata dalla U.S. Navy nel 1940, deriva da *radio detection and ranging*, definizione che racchiude le due finalità di rilevazione e localizzazione. I radar attuali si sono evoluti e sono stati perfezionati per classificare o identificare bersagli, ma anche per ricreare le immagini degli oggetti, ad esempio la mappatura del territorio dai satelliti in orbita.

Il principio del radar è che un segnale radio inviato da un trasmettitore viene deviato da qualsiasi oggetto incontrato (terra, mare, navi, aerei, etc.). Una piccola quantità di energia viene perciò riflessa verso un ricevitore. Dopo l'amplificazione del segnale da parte del ricevitore, i segnali sono elaborati sia attraverso una metodologia software che elettronica, al fine di ricavare dalla totalità degli echi ricevuti quelli utili per gli scopi di ricerca.

Vi sono molteplici applicazioni per il radar. Viene utilizzato, infatti, per rilevare oggetti le cui dimensioni spaziano su di una scala che varia da pochi centimetri fino all'estensione di oggetti planetari.

**Tabella 2** - Applicazioni del radar, suddivise in civili e militari, con relative sottoclassi.

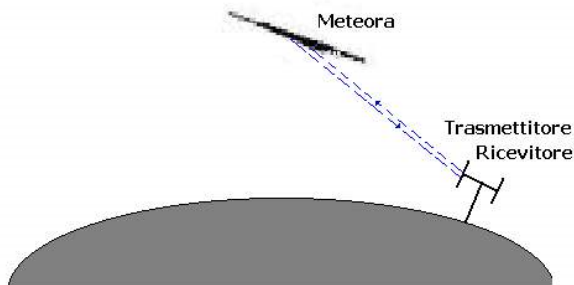
APPLICAZIONI RADAR		
Civili	Terra	Controllo traffico aereo
		Controllo traffico navale
		Previsioni meteorologiche
		Autovelox
		Sistemi di allarmi di sicurezza
		Astronomia e Geofisica
		Misure industriali
	Mare	Navigazione
		Prevenzione collisioni
	Aria	Altimetria
		Navigazione
	Spazio	Tempo meteorologico
		Studio delle risorse terrestri
		Controllo navette spaziali

Militari	Rilevamento	Forze nemiche ed alleate
	Inseguimento	Obbiettivi marini, terrestri, aerei o spaziali
	Guida	Sistemi di armi

Il radar meteorico può essere impiegato sia in campo geofisico, per quanto concerne l'analisi della fisica dell'alta atmosfera (studio di profili di densità e temperatura, venti, maree atmosferiche, onde di gravità, etc), sia in campo astronomico per lo studio della materia interplanetaria interagente con l'atmosfera stessa.

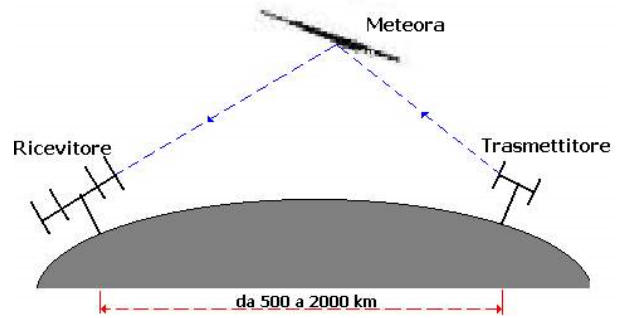
Tale radar può essere principalmente di due tipologie: *a back-scatter* (a retro-diffusione) e *a forward-scatter* (a diffusione in avanti).

Nel primo sistema il trasmettitore e il ricevitore sono localizzati nello stesso sito e dunque l'onda incidente e quella diffusa sono perpendicolari alla traccia meteorica. La richiesta a cui devono soddisfare le meteore per poter essere rivelate da un sistema a back-scatter è che la loro traccia sia tangente ad una sfera centrata sul radar. Dato che le tracce hanno un'estensione finita, alcune di esse non riescono a soddisfare la richiesta di essere ortogonali alla linea di vista del radar ed in tal caso il segnale di ritorno sarà estremamente debole e difficilmente potrà essere rivelato. Quindi il radar riesce a "vedere" solo una frazione degli oggetti che transitano nel suo campo di vista, ossia solo quelli aventi il giusto orientamento.



**Figura 3** - Schema di un radar meteorico a back-scatter.

Nel caso del forward-scatter i due apparati sono dislocati in posti diversi e conseguentemente la diffusione è di tipo obliquo. La condizione che la traccia deve soddisfare perché si abbia la ricezione dell'eco radar non è più l'ortogonalità della traccia meteorica con la linea di vista del radar, come visto nel back-scatter, bensì è richiesto che il raggio incidente e quello riflesso formino angoli uguali con l'asse della traccia. Ciò si traduce nella condizione che la colonna di plasma deve essere tangente ad un'ellissoide nei cui fuochi si trovano il trasmettitore e il ricevitore. Inoltre è opportuno che la distanza tra ricevitore e trasmettitore sia sufficientemente elevata in modo che la curvatura terrestre impedisca ai due apparati di "vedersi" direttamente (in altre parole, il ricevitore deve essere oltre l'orizzonte radio del trasmettitore). Solo in questo modo il sistema sarà capace di rivelare la traccia ionizzata della meteora.



**Figura 4** - Schema di un radar meteorico a forward-scatter.

Una differenza sostanziale fra i due sistemi sta quindi nel fatto che, mentre nei radar a back-scatter la stessa antenna viene utilizzata alternativamente dal circuito ricevente e da quello trasmittente, e quindi può usare solo onde pulsate, nei radar a forward-scatter, avendo apparati trasmittenti e riceventi separati, è opportuno operare in onda continua.

Bisogna dire che i sistemi radar a forward-scatter, sia in ambito civile che militare, non hanno avuto una diffusione così vasta come quelli a back-scatter, soprattutto a causa della complessa geometria del sistema per la localizzazione del bersaglio e della sincronizzazione fra trasmettitore e ricevitore necessaria per misurare la distanza dal bersaglio stesso [1]. La possibilità di avvalersi di un sistema a forward-scatter permette tuttavia di trarre ulteriori vantaggi rispetto al radar monostatico: innanzitutto non vi è il rischio di intercettare falsi bersagli posti a terra, come invece può avvenire nei sistemi monostatici; è possibile innalzare il tetto di osservazione delle meteore che, unito ad una maggiore persistenza dell'eco, porta al monitoraggio di una zona più estesa di atmosfera; si possono effettuare misure di concentrazione di ozono mesosferico e climatologia delle onde di gravità e dei moti atmosferici che influenzano nel tempo la distribuzione di costituenti minori nell'atmosfera media; costituisce una valida alternativa all'uso di satelliti per le comunicazioni al di sopra dell'orizzonte, attraverso l'impiego dei canali ionizzati lasciati dalle tracce meteoriche; infine non si è limitati dal traffico aereo, perciò si può far uso della tecnica ad onda continua che si rivela particolarmente consigliabile per la maggior sensibilità delle apparecchiature riceventi e per l'uso di ristrette bande di frequenza con una conseguente riduzione del livello di rumore.

### Caratteristiche del radar

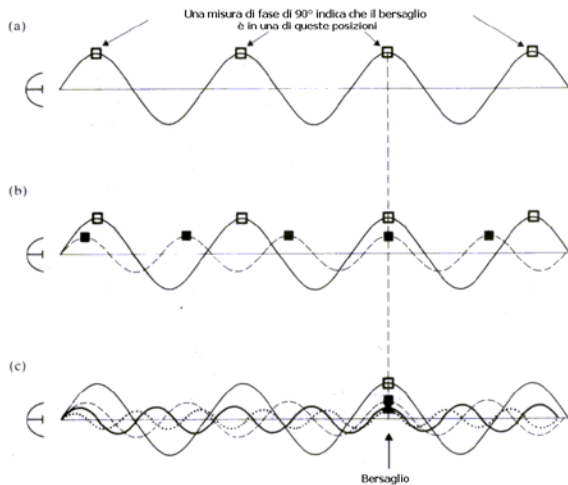
È interessante ora approfondire alcune delle proprietà che descrivono la qualità dello strumento, come la precisione, la risoluzione, il tempo di integrazione e lo spostamento doppler.

Con il termine precisione generalmente si indica l'incertezza nella misurazione della distanza assoluta di un oggetto. Sembrerebbe intuitivo associare questa caratteristica alla nitidezza della forma dell'impulso, tuttavia si scopre che il fattore cruciale che determina la precisione è l'ampiezza di banda. Se si utilizzasse una sola frequenza la determinazione della posizione di un

oggetto sarebbe approssimativa e produrrebbe delle inevitabili ambiguità, in quanto la misura della fase è periodica. Per ovviare a questo problema si utilizzano diverse bande di frequenza che migliorano la determinazione della misura. In prima approssimazione, una stima della larghezza di banda  $B$  è pari all'inverso della durata dell'impulso  $\tau$ :

$$B \approx \frac{1}{\tau}$$

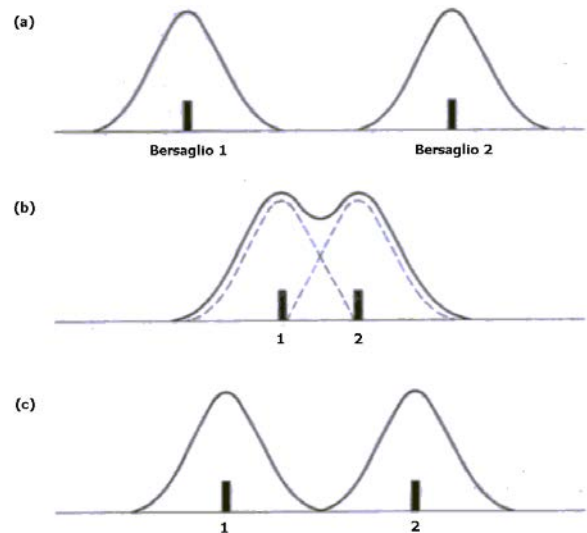
Ad esempio, un radar con frequenza di banda di 1 MHz che trasmette impulsi della lunghezza di 1  $\mu$ s ha una precisione di 150 metri. Se questo stesso radar fosse concepito per avere una precisione di 15 cm, dovrebbe trasmettere impulsi con un periodo di 1 ns, che corrisponderebbe ad una ampiezza di banda di 1 GHz.



**Figura 5** - Precisione del range in funzione dell'ampiezza di banda. (a) con un'unica frequenza, la precisione del bersaglio è scarsa e ambigua; (b) con due frequenze, la precisione e l'ambiguità migliorano (c) utilizzando più ampiezze di banda, le ambiguità vengono eliminate e la precisione aumenta ulteriormente.

Un altro fattore in grado di alterare la precisione delle misure è il rapporto segnale-rumore in quanto il rumore può modificare negativamente la forma dell'impulso. Con risoluzione si indica invece quanto devono essere distanti spazialmente due bersagli per poter essere discriminati dallo strumento. È possibile distinguere due echi separati se il ritardo di tempo tra gli echi provenienti da due oggetti è maggiore della durata dell'impulso  $\tau$ . Il criterio che stabilisce la risoluzione spaziale  $\Delta R$  fra due oggetti è dato dall'espressione

$$\Delta R \geq \frac{c\tau}{2}$$



**Figura 6** - Risoluzione radar. Due bersagli (a) facilmente risolvibili quando sono separati da un lasso di tempo superiore alla durata dell'impulso (b) irrisolvibili quando tale tempo è inferiore alla durata dell'impulso e (c) appena risolvibili quando esso uguaglia la durata dell'impulso.

Un'altra caratteristica è il tempo d'integrazione, vale a dire il tempo necessario affinché l'apparato ricevente sia in grado di integrare e sommare i dati a disposizione, in modo da rendere le misurazioni più precise possibili.

Un'ultima, ma importante proprietà è il modo con cui il radar può misurare la velocità di un oggetto. Un metodo si basa sulle variazioni della posizione del bersaglio nel tempo. In questo modo è facile introdurre delle incertezze a meno che non si inseguia il bersaglio per un lungo lasso di tempo. In realtà un metodo più preciso per calcolare la velocità di un bersaglio si basa sullo spostamento doppler, che consiste nella variazione della frequenza del segnale radio causata dal movimento del bersaglio: tanto più l'oggetto si avvicina velocemente al ricevitore, maggiore è l'aumento di frequenza. L'espressione che lega lo spostamento doppler in frequenza  $\Delta \nu$  con la componente della velocità radiale  $v_r$  è

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_T} = \frac{\nu_R - \nu_T}{\nu_T} = \frac{v_r}{c}$$

dove  $\nu_T$  è la frequenza del trasmettitore e  $\nu_R$  quella del ricevitore. Con questo metodo, tuttavia, si può calcolare unicamente la componente radiale della velocità.

### Bibliografia

[1] Kingsley S., Quegan S.: Understanding Radar Systems, edito da McGraw-Hill, London, (1992)