

R A D A R (a cura di L. Trapa*)

STORIA DEL RADAR (CENNI)

1911

Il principio del radar viene immaginato nel romanzo di **fantascienza** “Ralph 124 C 41+” dallo scrittore americano Gernsback.

1920

Viene realizzato un primo modello di **magnetron** a due poli, ma la potenza prodotta è molto limitata rispetto ai magnetron a cavità degli anni successivi.

1922

Guglielmo **Marconi** espone su basi scientifiche il **principio della riflessione** delle onde radio da parte di ostacoli e la possibilità di **utilizzarlo per rilevare la presenza di un oggetto**.

1924

Edward **Appleton** sperimenta la **riflessione ionosferica** sullo strato ionosferico da lui scoperto.

1924 e anni immediatamente successivi

Il francese Pier David **sperimenta la rivelazione di aerei in volo** mediante onde elettromagnetiche.

1930

Guglielmo Marconi **sperimenta la riflessione** delle onde radio centimetriche da parte di ostacoli.

* *Per approfondimenti:* Trapa. L., Elettrotecnica, elettronica, telecomunicazioni e automazione (IBN Editore)

1934-1935

Le ricerche nel campo della localizzazione di aerei in volo portano ai **primi risultati concreti**, in Inghilterra da parte di **Watson-Watt** e in Germania da parte di **Kuhnhold**. In campo navale un *sistema radar* con funzione anticollisione *viene installato* nel 1935 sul *transatlantico francese Normandie*.

1935

In **Italia Tiberio** (proseguendo gli studi di **Vallauri**) presenta, a un comitato delle forze armate, un progetto di **radiolocalizzatore, con portata di 50 Km**, il quale però non porta a risultati operativamente soddisfacenti per carenza di fondi.

1939

L'ingegnere italiano Agostino Del Vecchio **brevetta un prototipo di MAGNETRON**, ma la sua scoperta non suscita interesse nelle autorità politiche e militari italiane.

1936-37

Installazioni di radar a bordo di **navi USA e tedesche**.

1939

La Gran Bretagna possiede **20 stazioni radar collegate telefonicamente** fra loro, in grado di rivelare la presenza di aeromobili

- a quote superiori ai 3000 metri
- a distanze comprese fra 280 Km e 193 Km.

1940

All'università inglese di Birmingham, John Randall e Harry Boot realizzano un prototipo funzionante di **magnetron a cavità risonanti**, riuscendo successivamente ad aumentarne di un fattore 100 la potenza emessa.

1940

I sistemi radar britannici sono utilizzati –risultando determinanti- per la localizzazione di aerei tedeschi nel corso della **battaglia d'Inghilterra**.

1941

L'impiego di sistemi radar risulta decisivo per la vittoria degli inglesi a Capo Matapan contro la marina italiana che ne è sprovvista.

COS'E' UN RADAR

Il termine "RADAR" è acronimo di:

Radio Detection (rilevamento) And Ranging (localizzazione, misurazione della distanza)

e quindi può essere tradotto in italiano come:

"Radioapparato per il rilevamento e la localizzazione"

oppure come:

"Radioapparato per il rilevamento e la misurazione della distanza".

A COSA SERVE IL RADAR

In generale: a rilevare la presenza di un oggetto e a misurarne la distanza dalla stazione radar. L'oggetto viene indicato come "bersaglio" o "target".

CLASSIFICAZIONE DEI RADAR IN BASE AL SEGNALE EMESSO

1. RADAR A ONDA CONTINUA O RADAR CW (Continuous Wave)

- a. *Radar a onda continua NON modulata*
- b. *Radar a onda continua MODULATA (tipicamente in frequenza)*

2. RADAR A IMPULSI o RADAR IMPULSIVI

- a. *Radar impulsivi "semplici"*
- b. *Radar impulsivi CON INFORMAZIONE DOPPLER
(o RADAR **MTI** Moving Target Indication)*

RADAR CON INFORMAZIONE DOPPLER

Da quanto detto risulta che l'effetto Doppler viene utilizzato nei seguenti tipi di radar:

- *in quei particolari Radar a impulsi che sono denominati MTI (Moving Target Indication)*
- *nei Radar ad onda continua NON modulata o radar CW (che sono intrinsecamente dei Radar Doppler, in quanto sono basati proprio su questo fenomeno); questi radar misurano la velocità relativa del bersaglio, ma non la distanza*
- *nei radar a onda continua modulata in frequenza, o radar CW-FM (che sfruttano l'effetto Doppler solo nei casi di bersagli in movimento); i radar CW-FM possono essere comunque in grado di misurare la distanza di bersagli mobili, purché si tratti di bersagli singoli¹*

¹ La rilevazione di bersagli multipli con radar CW-FM è possibile, ma solo rendendo il dispositivo molto complicato

CLASSIFICAZIONE DEI RADAR IN BASE AL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Tenendo conto del principio di funzionamento possiamo raggruppare i radar in tre categorie:

- ***RADAR A IMPULSI***
La distanza dal bersaglio si determina misurando il ritardo che intercorre fra la trasmissione di un impulso e la ricezione della sua eco.
- ***RADAR A ONDA CONTINUA (A MODULAZIONE DI FREQUENZA)***
Si modula in frequenza l'onda trasmessa e si misura la differenza temporale fra questa modulazione e quella dell'eco ricevuta. Funzionano in questo modo i cosiddetti "radio altimetri".
- ***RADAR A EFFETTO DOPPLER***
È basato sulla misura della differenza o battimento tra la frequenza del segnale ricevuto dalla stazione radar (segnale che si è riflesso sul bersaglio) e la frequenza del segnale trasmesso dalla stazione stessa.
- ***RADAR MULTIMODO***
È un radar a impulsi² che differisce da una normale apparecchiatura a impulsi per la tecnologia realizzativa più avanzata e sofisticata e per la maggiore flessibilità di impiego (per esempio può lavorare in modalità aria-terra, in modalità aria-aria, in modalità ground mapping ecc.)
Queste caratteristiche sono essenzialmente dovute ai motivi seguenti:
 1. il trasmettitore, realizzato mediante un tubo a onda progressiva TWT, Traveling Wave Tube (in luogo di un magnetron) permette di variare l'ampiezza e la frequenza degli impulsi emessi in funzione di un segnale di controllo
 2. gestione computerizzata: due processori, ossia due dispositivi programmabili, provvedono:
 - a elaborare tutte le informazioni relative al segnale ricevuto
 - a monitorare e controllare tutte le funzioni.

² oppure un radar che racchiude in sé un' apparecchiatura impulsi e un' apparecchiatura doppler

BANDE RADAR

Un singolo radar o è in banda X (frequenza più alta) oppure è in banda S (frequenza più bassa).

Una singola apparecchiatura funziona su una sola delle due bande.

Se le norme di sicurezza SOLAS/IMO prevedono, su una nave, la presenza sia di un radar in banda X che di un radar in banda S, allora i radar a bordo saranno due, ciascuno con la propria antenna (più grande per la banda S).

La presenza di **entrambi i radar** è prescritta da SOLAS/IMO per imbarcazioni che **superano 3000 GT** (Gross Tonnage³, cioè **3000 tonnellate di stazza lorda**).

Per imbarcazioni **inferiori a 3000 GT** è previsto **il solo radar in banda X**, che è più piccolo, più leggero, richiede antenne più corte, ma è più soggetto ai disturbi della pioggia (rain clutter) e del moto ondoso (sea clutter).

Per imbarcazioni **superiori a 10000 GT** è prevista anche la presenza di un **radar ARPA**, cioè di un radar ad **elaborazione automatica dei dati**.

³ Stazza = volume di una nave

Stazza lorda = volume totale interno dei locali delle navi mercantili, compresi anche i locali che non possono essere usati per lo stivaggio delle merci

Stazza netta = volume totale dei locali che non possono essere usati per lo stivaggio delle merci

GT = Gross Tonnage = stazza lorda

GT = (volume in m³)·k con k= (0,22-0,32) a seconda della grandezza della nave
GT, cioè la stazza lorda, è maggiore della “stazza di registro” (misurata in “tonnellate di stazza o di registro” equivalenti a 100 piedi inglesi, corrispondenti a circa 2,83 m³)

TABELLA delle BANDE RADAR

I radar nautici funzionano essenzialmente in banda S e in banda X

NOME della BANDA	INTERVALLO di FREQUENZE	INTERVALLO di LUNGHEZZE d'ONDA	PORTATA in miglia (mg)	UTILIZZAZIONI IMPORTANTI
P	< 300 MHz	< 1m	300	
L	(1 ÷ 2) GHz	(15 ÷ 30) cm	250	Traffico aereo a lungo raggio, sorveglianza aerea
S	(2 ÷ 4) GHz	(7,5 ÷ 15) cm	100	radar NAUTICI ⁴ radionavigazione marittima radar beacons radar meteo a lungo raggio, controllo del traffico aereo nei terminal
C	(4 ÷ 8) GHz	(3,75 ÷ 7,5) cm	70	radar NAUTICI MULTIFUNZIONALI
X	(8 ÷ 12) GHz	(2,5 ÷ 3,75) cm	50	radar NAUTICI ⁵ radar meteo radar terrestri aeroporti USA puntamento missili
K	(12 ÷ 40) GHz	(0,75 ÷ 2,5) cm		Sorveglianza aeroportuale e traffico a terra Creazione mappe ad alta risoluzione cartografia seeker ⁶ missilistici.

⁴ Pregi dei radar nautici in banda S:

esplorazione e scoperta più lontane, mancanza di effetti “maschera” (zone d'ombra) per effetto del fumaiolo o di altre strutture della nave, **maggiore immunità dai disturbi** dovuti alla pioggia e al moto ondoso

⁵ Pregi dei radar nautici in **banda X**:

maggiore **risoluzione angolare, migliore scoperta dei bersagli bassi**, maggiore **immunità** dai disturbi **elettromagnetici esterni**

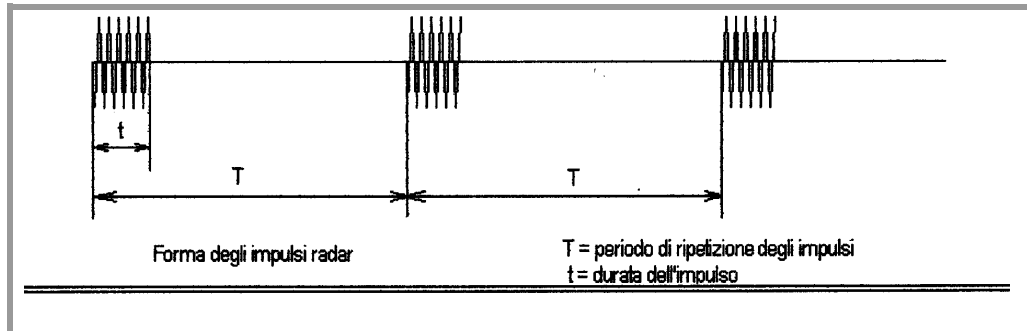
⁶ sistemi elettronici di guida dei missili per la ricerca e inseguimento del bersaglio da parte del missile stesso

RADAR A IMPULSI

COME FUNZIONA IL RADAR A IMPULSI

La stazione radar è costituita da un trasmettitore, un'antenna, un ricevitore e un display sul quale viene visualizzata la posizione dell'oggetto rilevato.

Il trasmettitore radar emette un segnale impulsivo formato da pacchetti "rettangolari" di microonde sinusoidali



Se il segnale emesso non incontra nessun ostacolo, si disperde e non accade nulla.

Se invece incontra un ostacolo (per esempio un aereo, una nave, una montagna) viene, almeno parzialmente, riflesso dall'ostacolo e torna indietro verso la stazione radar dove viene captato dal ricevitore.

Siccome le onde elettromagnetiche (e.m.) si propagano ad una velocità nota v_p , è possibile determinare la distanza dall'ostacolo misurando il tempo T che intercorre fra l'emissione e la ricezione del segnale.

Dal momento che:

$$\text{velocità } (v_p) = \text{distanza } (l) / \text{tempo } (T)$$

ossia:

$$v_p = \frac{l}{T}$$

si ha:

$$\text{distanza} = \text{velocità} \cdot \text{tempo}$$

ossia:

$$l = \frac{1}{2} v_p \cdot T$$

dove figura una divisione per 2 perché il tempo T è quello di andata e ritorno e quindi è relativo al doppio della distanza che interessa.

Il principio di funzionamento del radar si fonda sull'invio di onde radio verso un bersaglio e sulla captazione delle onde riflesse. Più che di riflessione sarebbe giusto parlare di irradiazione: un corpo che presenti valori di permeabilità magnetica e di costante dielettrica diversi da quelli dello spazio circostante diventa sede di correnti indotte.

Le correnti indotte generano a loro volta onde elettromagnetiche analoghe a quelle incidenti, secondo determinate direzioni.

L'entità di questa irradiazione è **tanto più rilevante quanto minore è la lunghezza d'onda** dei segnali utilizzati **rispetto alle dimensioni del bersaglio**.

In altri termini **per individuare un bersaglio** bisogna usare **lunghezze d'onda più piccole del bersaglio** stesso.

Più piccolo è il bersaglio, più piccola deve essere la lunghezza d'onda λ e più alta deve essere la frequenza.

COME È FATTO IL RADAR A IMPULSI

SCHEMA SEMPLIFICATO DI PRINCIPIO

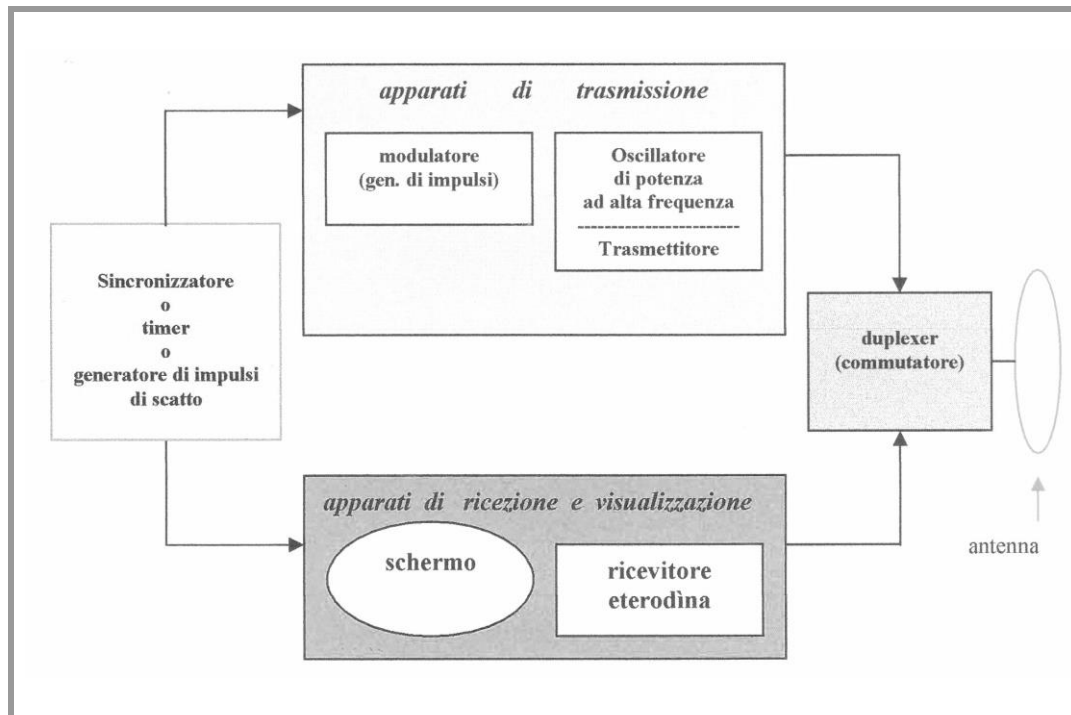
Una stazione radar può essere rappresentata, a grandi linee, con lo schema a blocchi della figura seguente, nella quale si individuano:

- un timer per la sincronizzazione dell'apparato
- una sezione trasmittente che ha la funzione di produrre il segnale da inviare in antenna, segnale formato da pacchetti di impulsi sinusoidali
- una sezione ricevente, basata sugli stessi principi del normale radioricevitore domestico
- un'antenna (detta anche "scanner"), che irradia nello spazio, sotto forma di onda elettromagnetiche, il segnale emesso dal trasmettitore e che capta le onde emesse dai bersagli
- un commutatore, il duplexer, che, durante la trasmissione, isola il ricevitore dall'antenna.

TECNOLOGIA REALIZZATIVA

Benché siano in produzione moduli trasmettitori e ricevitori allo stato solido, cioè a semiconduttore, è ancora largamente diffusa, per gli oscillatori e gli amplificatori, la tecnologia dei tubi a vuoto⁷ (magnetron, klystron, ecc.), in grado di fornire potenze di uscita più elevate.

⁷ chiamati anche "valvole"

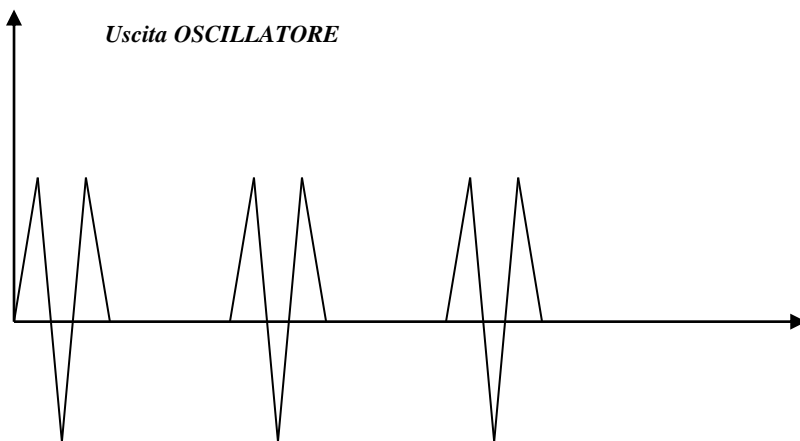
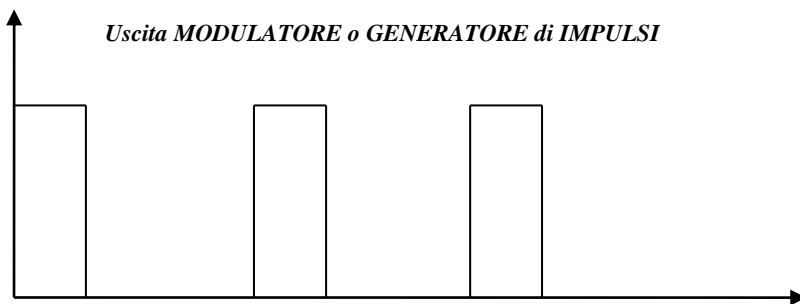
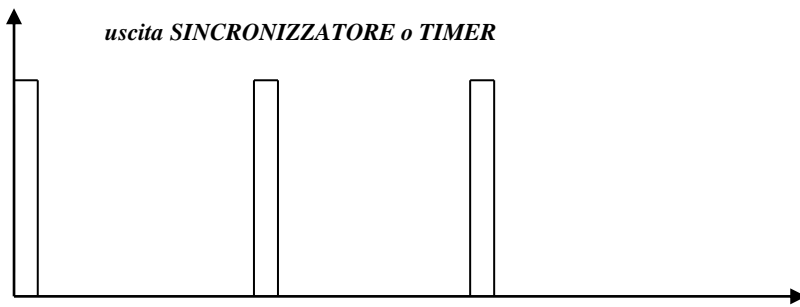


PRINCIPALI SEGNALI PRESENTI NELL'APPARATO RADAR

Il timer emette una sequenza periodica di impulsi stretti, che sincronizzano sia il trasmettitore che l'apparato di visualizzazione.

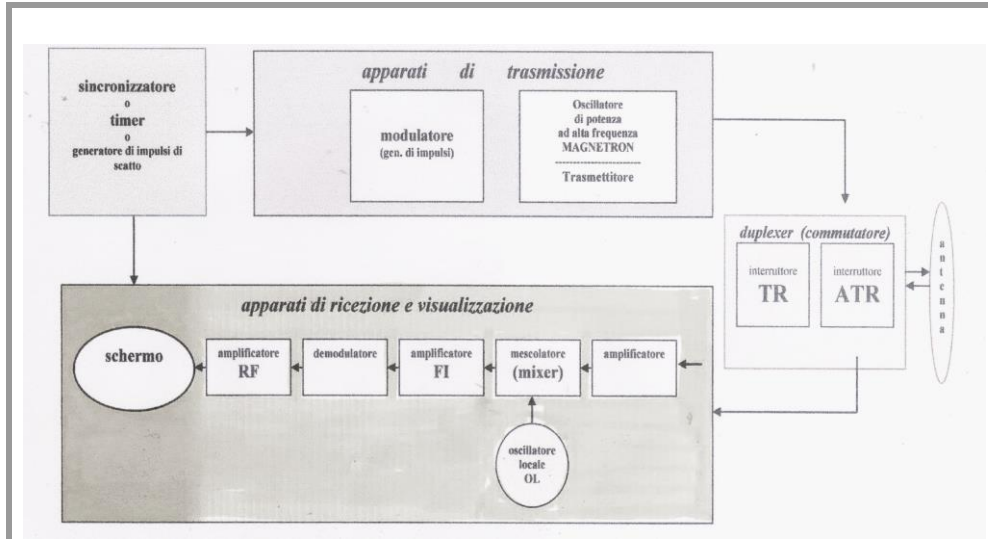
Il modulatore, ogni volta che riceve un impulso stretto dal timer, genera un impulso rettangolare di durata τ .

L'oscillatore di trasmissione (tipicamente un magnetron), pilotato dal modulatore, emette una sequenza periodica di pacchetti di onde sinusoidali, ognuno dei quali ha durata τ .



RADAR A IMPULSI: UN POSSIBILE SCHEMA A BLOCCHI

Un'analisi un po' più approfondita dell'apparato radar può essere condotta attraverso lo schema qui rappresentato e la descrizione dei blocchi riportata di seguito.



I BLOCCHI DEL SISTEMA RADAR A IMPULSI

Elenchiamo le funzioni svolte dai singoli blocchi:

SINCRONIZZATORE (SYNC)

o TIMER

o GENERATORE di IMPULSI di SCATTO

Genera gli impulsi di sincronismo o di clock che “accendono” il modulatore, modulatore che è anch'esso un generatore di impulsi (più lunghi) che abilitano l'oscillatore.

Il sincronizzatore quindi produce gli impulsi di clock che pilotano:

- il modulatore/generatore di impulsi (ad ogni impulso proveniente dal sync il modulatore produce, a sua volta, un suo impulso)
- la scansione del CRT (Tubo a Raggi Catodici) dello schermo.

MODULATORE / GENERATORE DI IMPULSI

Ha la funzione di sagomare in forma di pacchetti impulsivi l'onda sinusoidale ad alta frequenza (gamma delle microonde) generata dal blocco oscillatore/trasmittitore.

Il modulatore/generatore di impulsi è in sostanza un generatore di impulsi rettangolari i quali abilitano (al ritmo del segnale di sincronismo) il segnale dell'oscillatore (blocco successivo) in modo che l'onda generata da quest'ultimo risulti avere carattere impulsivo⁸.

Il modulatore è costituito da:

- o un alimentatore ad alta tensione
- o una linea o una rete formatrice di impulsi
- o un interruttore ad alta tensione, come un thyatron⁹ o un SCR¹⁰ (soluzione attuale)

OSCILLATORE / TRASMETTITORE

Emette brevi impulsi di microonde.

E' un generatore di onda sinusoidale ad alta potenza e alta frequenza.

Può essere realizzato mediante uno dei seguenti componenti:

- o un triodo (per frequenze minori di 1GHz)
- o un klystron¹¹
- o un magnetron
- o un tubo a onda viaggiante (TWT, Traveling Wave Tube¹²)

⁸ se non ci fossero gli impulsi del modulatore, il blocco seguente, cioè l'oscillatore, emetterebbe una semplice onda sinusoidale “ininterrotta” e non pacchetti di cicli di sinusoide

⁹ Il thyatron è un particolare tubo a vuoto, cioè una “valvola” (per esempio un triodo o un tetrodo) ad atmosfera di gas di mercurio o idrogeno usato come interruttore nei circuiti di controllo, attualmente può essere sostituito dall'SCR.

Ricordiamo che il triodo è una valvola con anodo, catodo e griglia (per il controllo della corrente) e che è tipicamente usato come amplificatore.

Il tetrodo è un triodo con una griglia in più.

¹⁰ Raddrizzatore Controllato al Silicio, componente allo stato solido per il controllo della potenza elettrica

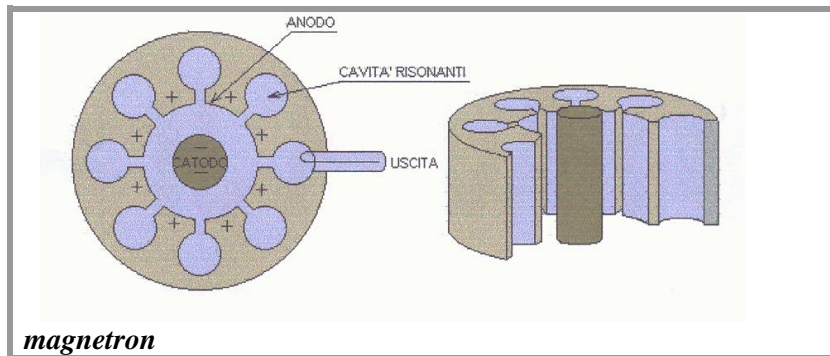
¹¹ Il klystron è un tubo elettronico per microonde utilizzato come amplificatore e, se opportunamente collegato in retroazione positiva, come oscillatore.

Nell'applicazione come oscillatore si usa un particolare tipo di klystron detto “reflex” caratterizzato da un'unica cavità risonante anziché da due.

Gli elettroni emessi dal catodo vengono accelerati o frenati da griglie, e mandati su e giù (in regime oscillatorio). Infine sono fatti cadere sulle griglie stesse, dove producono una corrente.

MAGNETRON

Un classico oscillatore di potenza per microonde, utilizzato nei **radar a impulsi**, è un tubo elettronico chiamato **MAGNETRON**.



COSA FA IL MAGNETRON

Il magnetron **produce oscillazioni sinusoidali di campo elettromagnetico** (onde e.m.) con potenza istantanea di alcuni **MW** e frequenza di alcuni **GHz**.

Le oscillazioni e.m. vengono sostenute dallo scambio di energia che si stabilisce fra gli elettroni emessi dal catodo¹³ e il campo e.m. stesso.

Gli elettroni sono forzati a descrivere una traiettoria cicloidale nello spazio compreso fra anodo e catodo per effetto del campo magnetico assiale (generato da un magnete posto intorno all'anodo) e di un campo elettrico radiale.

Gli elettroni che terminano la loro traiettoria sull'anodo danno luogo a una corrente anodica.

La corrente e le onde e.m. sono prelevate da una piccola sonda applicata in una delle cavità dell'anodo e convogliate verso il duplexer, e quindi verso l'antenna (mediante cavo coassiale o guide d'onda).

COME È FATTO IL MAGNETRON

È costituito da un cilindro di metallo forato con un catodo (-) al centro e un anodo (+) che è formato da tutta la struttura esterna. Il corpo dell'anodo è caratterizzato da fori cilindrici detti "risonatori" o "cavità risonanti" all'interno dei quali gli elettroni compiono la loro traiettoria.

¹² Il tubo, o amplificatore, a onda progressiva (detto anche "a onda viaggiante") è usato nel campo delle telecomunicazioni ed è un amplificatore di potenza per microonde realizzato mediante un tubo elettronico.

Il TWT è generalmente formato da un cannone elettronico (che a sua volta comprende un catodo, un filamento di forma elicoidale e un anodo), da un sistema di focalizzazione del fascio elettronico, da un attenuatore e da un collettore.

Il segnale a RF da amplificare viene applicato a un estremo del filamento elicoidale e prelevato all'altro. Tipicamente i TWA sono caratterizzati da:

- fattore di amplificazione compreso fra 1000 e un milione
- potenza in uscita di valore compreso fra i mW e i KW
- larghezza di banda di un'ottava
- impedenza nominale pressoché costante su tutta la banda delle microonde.

¹³ In seguito all'applicazione fra anodo e catodo di impulsi di tensione con ampiezza di alcune decine di KV

Ogni cavità si comporta come un circuito risonante parallelo nel quale il condensatore è costituito dai bordi affacciati dell'imbocco della cavità e l'induttore è costituito dal contorno interno ricurvo dell'incavo cilindrico, contorno che fa da spira.

Le cavità contigue risultano accoppiate per la mutua induttanza che si manifesta tra le spire.

Per effetto delle correnti variabili indotte dal passaggio degli elettroni, le cavità si eccitano e diventano sede di oscillazioni ad altissima frequenza.

Per i *radar multimodo* il trasmettitore è tipicamente realizzato mediante un *tubo a onda progressiva (TWT, Traveling Wave Tube)*, un dispositivo che è in grado di variare l'ampiezza e la frequenza del segnale di uscita in funzione di un segnale di controllo.

DUPLEXER (COMMUTATORE)

È un dispositivo di commutazione che:

- in fase di trasmissione dirige verso l'antenna gli impulsi generati isolando gli apparati di ricezione che altrimenti verrebbero danneggiati
- in fase di ricezione (ossia quando il trasmettitore non è attivo) dirige il segnale proveniente dall'antenna verso il ricevitore isolando gli apparati di trasmissione.

Da quanto detto si comprende che il radar o trasmette o riceve e non può svolgere contemporaneamente le due funzioni.

Il duplexer è necessario quando il radar è dotato di un'unica antenna sia per la trasmissione che per la ricezione, oppure quando le antenne, pur essendo distinte, non sono abbastanza isolate una dall'altra.

Il duplexer è collegato all'antenna da una **guida d'onda**.

Nello schema più dettagliato, il duplexer è espanso in due blocchi: **TR** (interruttore veloce di Trasmissione e Ricezione) e **ATR** (interruttore di anti-Trasmissione/Ricezione).

Il TR, posto fra antenna e ricevitore, disaccoppia dall'antenna l'apparato ricevente in fase di trasmissione: se ciò non accadesse, il ricevitore potrebbe subire danni tanto più ingenti quanto maggiore è la potenza del segnale trasmesso.

L'ATR convoglia il segnale, durante la ricezione, dall'antenna al ricevitore, evitando così che una quota della potenza ricevuta venga dissipata nel trasmettitore.

L'ATR è inattivo in fase di trasmissione.

RICEVITORE

Generalmente è analogo ai comuni radioricevitori domestici. Si tratta cioè di un ricevitore “eterodina” ossia a conversione di frequenza.

È caratterizzato da:

- valori di frequenza intermedia di circa 100MHz
- figura di rumore più piccola possibile
- alta sensibilità, larghezza di banda uguale alla frequenza degli impulsi prodotti.

Il ricevitore può essere distinto, a partire dall’antenna, nei seguenti blocchi fondamentali:

- **amplificatore:** può essere, per esempio, un amplificatore a basso rumore o un tubo a onda progressiva (TWT); a volte non è presente e le sue funzioni sono svolte dal mixer
- **mixer e oscillatore locale:** realizzano il convertitore di frequenza, portando la frequenza del segnale ricevuto a un valore più basso, detto “frequenza intermedia”; questa conversione permette di semplificare la realizzazione di amplificatori a banda stretta e ad alto guadagno; l’oscillatore locale può essere realizzato con un klystron reflex
- **amplificatore FI** (a Frequenza Intermedia): è tipicamente caratterizzato da:
 - frequenza centrale di valore compreso fra 30MHz e 60MHz
 - larghezza di banda compresa 1MHz e MHz.

ANTENNE: UNA O DUE?

In linea generale i radar **a impulsi** possono avere **un'unica antenna** per la trasmissione e la ricezione, mentre il radar a onda continua ha antenne separate: ciò per motivi di isolamento del ricevitore: bisogna evitare che al ricevitore possa arrivare (attraverso l'antenna) il segnale trasmesso, il quale è caratterizzato da un'elevata potenza e lo danneggerebbe.

Nel radar **a impulsi** si può usare quindi un'**unica** antenna.

Mediante il **duplexer**, in fase di ricezione, viene interrotta la trasmissione così da diminuire ogni rischio per il ricevitore.

Sarebbe però impossibile fare la stessa cosa per un radar a onda continua perché un segnale CW non può essere interrotto. Perciò i radar CW devono avere due antenne.

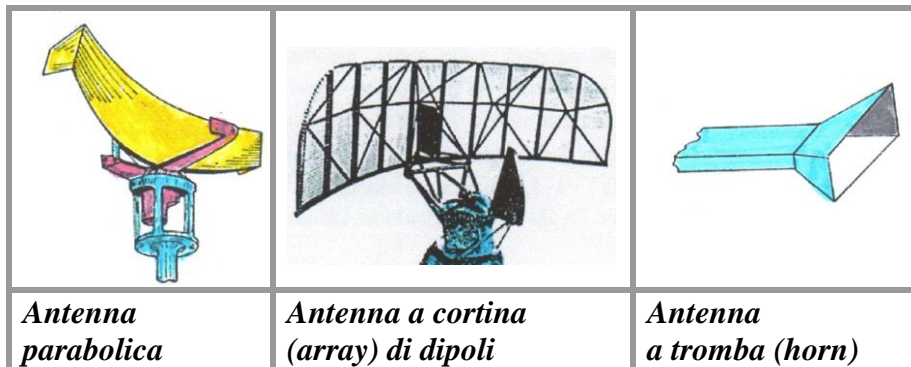
Per radar a onda continua di portata limitata può essere usata un'unica antenna se si prende uno di questi accorgimenti:

- Antenna dotata di due bracci isolati mediante una giunzione ibrida (a T magico) o un circolatore o una giunzione in quadratura.
- polarizzazioni ortogonali in trasmissione e in ricezione.

TIPI DI ANTENNA RADAR

Fra i tipi più diffusi di antenna radar vi sono:

- antenna parabolica
- antenna a cortina (array) di dipoli
- antenna a tromba (horn)



L'ALIMENTAZIONE DEL RADAR

L'alimentazione richiesta dal radar è **in continua**.

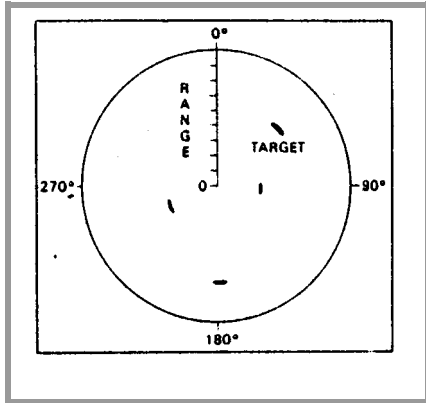
Qualora la nave o l'aeromobile dispongano di tensioni e correnti in alternata, queste devono essere **convertite in continua** e alle ampiezze opportune.

All'apparato radar, e in particolare alla linea artificiale del modulatore, che ha bisogno di qualche KV DC, è applicata una tensione continua ottenuta dalla rete di bordo mediante trasformatore e raddrizzatore.

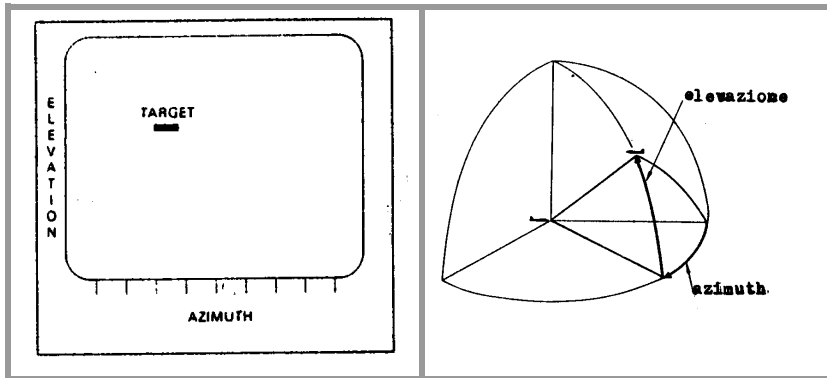
DISPLAY (SCHERMO)

Ne esistono di vari tipi. Accenniamo a due fra i più diffusi:

- 1) DISPLAY di tipo **PPI** (Plan Position Indicator): il bersaglio è presentato in coordinate **polari**, con origine nel punto in cui si trova il radar. E' particolarmente adatto ai radar, come quelli **di terra**, che hanno copertura di 360°.



- 2) DISPLAY di TIPO "C": in ascissa è riportato l'azimuth del bersaglio e in **ordinata l'elevazione** rispetto al radar. E' molto usato nel combattimento aereo perché corrisponde a ciò che il pilota vede realmente.



FREQUENZA, DIMENSIONI, POTENZA DEL RADAR A IMPULSI

Onde a **bassa frequenza** (grande λ) richiedono **grandi antenne e grandi dimensioni** del radar e consentono quindi l'impiego di **grosse potenze di trasmissione** (ricordiamo che solo grossi apparati sono in grado di dissipare le notevoli quantità di calore relative alle grosse potenze elettriche).

Per questo motivo i radar di **grande potenza** (ordine dei MW) sono quelli, di **grosse dimensioni**, che lavorano a “**bassa frequenza**” (centinaia di MHz, corrispondenti a lunghezze d’onda dell’ordine del metro).

Bassa Freq. → apparati GROSSI → GRANDE potenza

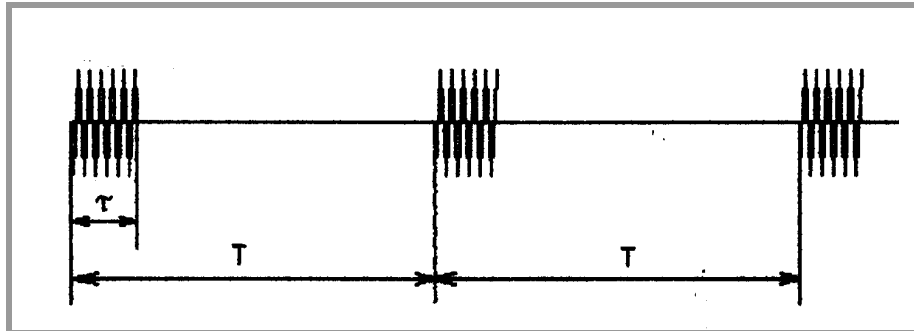
Onde ad **alta frequenza** (piccola λ) **non** richiedono grandi antenne e grandi dimensioni del radar.

Perciò, se si dimensiona un radar in base all’alta frequenza del segnale, l’apparato risulterà di piccole dimensioni e non sarà in grado di dissipare le rilevanti quantità di calore conseguenti alle grosse potenze.

Per questo motivo i **radar ad alta frequenza** (onde millimetriche, centinaia di GHz) sono di **piccole dimensioni** e sono caratterizzati da **piccole potenze** di trasmissione. (qualche centinaio di W).

Alta Freq. → apparati PICCOLI → PICCOLA potenza.

POTENZA, CICLO DI LAVORO, DISTANZE MIN E MAX DI FUNZIONAMENTO DI UN RADAR A IMPULSI



Come si vede dalla figura:

τ = DURATA dell'IMPULSO
 T = PERIODO di ripetizione degli impulsi

Generalmente:

T = centinaia di μ s
 $\tau = T / 100$

Definiamo ora il **CICLO DI LAVORO** o **DUTY CYCLE** δ come: $\delta = \frac{\tau}{T}$

oppure come: $\delta_{\%} = \frac{\tau}{T} \cdot 100$

Detta P_i la **potenza di picco dell'impulso**, si ha:

POTENZA MEDIA DEL TRASMETTITORE: $P_m = \frac{P_i \cdot \tau}{T} = P_i \cdot \delta$

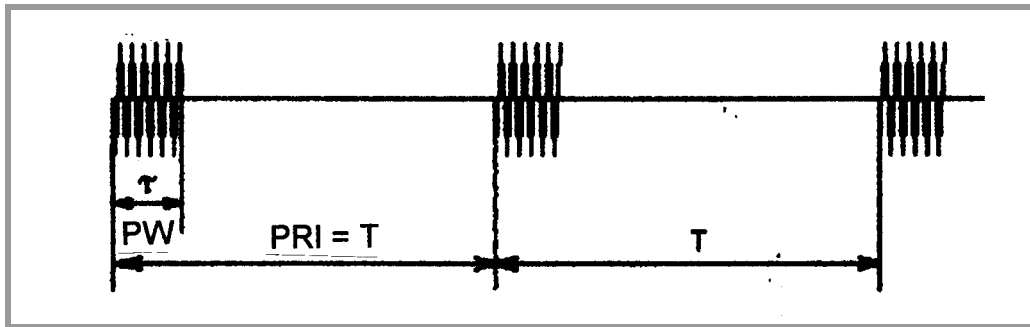
PRF, PRI E LUNGHEZZA SPAZIALE DELL'IMPULSO

Oltre alla frequenza f della portante sinusoidale, definiamo, per gli impulsi radar, tre parametri:

$PW = \tau = \text{Pulse Width} = \text{DURATA}$ del singolo impulso¹⁴

$PRF = \text{Pulse Repetition Frequency} = \text{FREQUENZA}$ di ripetizione degli IMPULSI¹⁵

$PRI = T = \text{Pulse Repetition Interval} = \text{PERIODO}$ (o Intervallo) di ripetizione del singolo IMPULSO.



In base alle definizioni date, sussistono le relazioni:

$$PRI = \frac{1}{PRF}$$

$$PRF = \frac{1}{PRI}$$

Definiamo poi una “lunghezza spaziale dell’impulso”, detta “ l_{PULSE} ”, come prodotto della durata temporale (quella che abbiamo chiamato τ o PW) per la velocità dell’impulso stesso (che possiamo assumere pari alla velocità c delle onde e.m. nel vuoto):

lunghezza spaziale dell’impulso = (durata temporale dell’impulso) · (velocità dell’impulso)

$$l_{pulse} = c \cdot \tau$$

¹⁴ I valori tipici sono compresi tra le frazioni e le centinaia di microsecondi

¹⁵ I valori tipici sono compresi tra le centinaia di Hz e le centinaia di KHz

(Possiamo dire che la “lunghezza spaziale dell’impulso” è lo spazio (lunghezza) occupato dall’impulso nel corso della sua durata temporale oppure che è la distanza che l’impulso percorre nell’intervallo di tempo della sua durata)

DURATA τ DEL SINGOLO PACCHETTO E DISTANZA MINIMA DI FUNZIONAMENTO DI UN RADAR A IMPULSI

La portata minima del radar (detta anche portata minima di telemetraggio), ossia la minima distanza di funzionamento, è determinata dalla durata τ del singolo pacchetto. Durante la trasmissione del pacchetto il ricevitore non è in grado di rilevare nessuna eco perché è saturato dall’intenso campo di trasmissione.

(Pertanto la durata temporale τ del pacchetto e la lunghezza spaziale ℓ_{pulse} devono essere abbastanza piccoli da evitare che i primi echi tornino all’antenna quando ancora questa è impegnata nell’emissione dell’impulso stesso).
Deve quindi essere:

$$D \geq \frac{1}{2} \cdot c \cdot \tau \quad \text{ossia:} \quad D \geq \frac{1}{2} \cdot \ell_{pulse}$$

e quindi:

$$D_{\min} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \tau$$

ossia:

$$D_{\min} = \frac{1}{2} \cdot \ell_{pulse}$$

La distanza minima di funzionamento è perciò la metà della lunghezza spaziale dell’impulso. Il radar può funzionare solo a distanze che siano almeno la metà della durata spaziale dell’impulso, cioè la metà di $c \cdot \tau$

Supponiamo, per esempio che la durata del pacchetto sia: $\tau = 1\mu s$.

La distanza al di sotto della quale il radar non può rilevare bersagli, ossia la portata minima di telemetraggio, si determina in questo modo:

in generale è:

$$\text{velocità} = \frac{\text{distanza}}{\text{tempo}}$$

$$\text{distanza} = \text{velocità} \cdot \text{tempo}$$

nel nostro caso:

distanza percorsa dall'eco = andata e ritorno dal bersaglio=

$$= (\text{velocità dell'onda e.m.}) \cdot (\text{durata del pacchetto})$$

distanza radar-bersaglio = ($\frac{1}{2}$) distanza di andata e ritorno dal bersaglio =

$$..= (\text{velocità dell'onda e.m.}) \cdot (\text{durata del pacchetto})$$

$$D_{\min} = \frac{1}{2} c \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6} \text{ s} = \frac{1}{2} \cdot 300 \text{ m} = 150 \text{ m}$$

PORTATA DI BASE

o MASSIMA DISTANZA NON AMBIGUA

o “DISTANZA AL DI SOPRA DELLA QUALE I BERSAGLI APPAIONO COME ECHI DI SECONDA TRACCIA”

La grandezza $\frac{1}{2} \cdot c \cdot \tau$, oltre a rappresentare la minima distanza di funzionamento, può anche essere definita come “portata di base” o “massima distanza non ambigua” o “distanza al di sopra della quale i bersagli appaiono come echi di seconda traccia”.

$$D_{\min} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \tau \quad \text{rappresenta quindi anche:}$$

- la **distanza di un bersaglio** che si trovi a **fondo scala** (di qui il nome di “portata di base”)
- la **metà** della distanza **percorsa** da un impulso **prima che parta il successivo**¹⁶
- la massima distanza che può avere un bersaglio perché si possa avere un radioeco prima della partenza dell’impulso successivo
- la **distanza al di sopra della quale** i bersagli appaiono come “**echi di seconda traccia**”, cioè come echi che arrivano **dopo** l’inizio della trasmissione dell’impulso successivo (impulsi, questi ultimi che possono fornire una misura **ambigua della distanza**); di qui il nome di “massima distanza non ambigua”.

¹⁶ Infatti: fra un impulso e l’altro intercorre un tempo $T=PRI$ e gli impulsi viaggiano a velocità “c” Quindi un impulso percorre, prima che parta il successivo, una distanza cT . Pertanto la metà della distanza percorsa da un impulso prima che parta il successivo è proprio

$$\frac{1}{2} \cdot c \cdot \tau$$

DISTANZA MINIMA RILEVABILE o DISTANZA MINIMA DI LOCALIZZAZIONE

$$D_{\min LOC} = \frac{3}{4} \cdot c \cdot \tau$$

È un limite inferiore di distanza dovuto:

- al fatto che l'antenna non può ricevere finché trasmette
- al ritardo di apertura del circuito ricevente

Questa distanza può essere stimata in $\frac{3}{4} \cdot c \cdot \tau$.

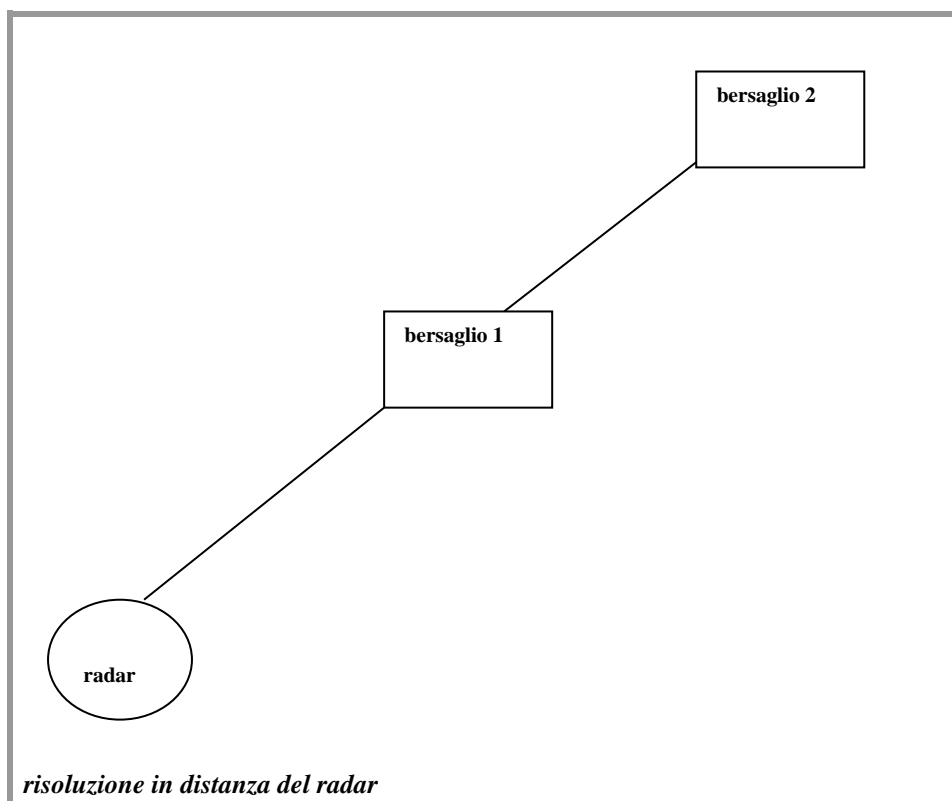
RISOLUZIONE IN DISTANZA ΔR_{\min}

RELAZIONE FRA LA MINIMA DISTANZA DI FUNZIONAMENTO ΔR_{\min} E LA DURATA (τ O PW) DEGLI IMPULSI

Per risoluzione **in distanza**¹⁷ o risoluzione **telemetrica** di un radar intendiamo la sua capacità di distinguere due bersagli vicini, allineati lungo la stessa direzione radar-bersaglio (ma aventi dal radar distanze diverse).

Possiamo anche dire che la **risoluzione telemetrica** è la **minima distanza** che **due bersagli possono avere tra loro** perché il radar sia in grado di “vederli” **distinti uno dall'altro**.

Quindi per distanze minori della distanza minima chiamata “risoluzione” il radar vede i due bersagli come un unico oggetto.



Se la risoluzione è la minima distanza alla quale due bersagli appaiono distinti, allora possiamo dire che la risoluzione in distanza di un radar è tanto migliore quanto più piccolo è il numero che la esprime.

La risoluzione viene definita come:

$$\Delta R_{\min} = \frac{1}{2} \cdot l_{PULSE} \quad \text{o, in maniera equivalente, come:} \quad \Delta R_{\min} = \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot c$$

¹⁷ Indicata anche come D_{\min} in alcuni testi.

Questa risoluzione ha lo **stesso valore** della **distanza minima di funzionamento**

Se, per esempio la durata del pacchetto di impulsi è $\tau = 4\mu\text{s}$, si ha:

$$\Delta R_{\text{MIN}} = 600\text{m}$$

Tipicamente è:

- ❖ frazioni di microsecondo $< \tau <$ centinaia di microsecondi
- ❖ $\Delta R_{\text{min}} \cong 100\text{m}$

Pertanto affinché la distanza ΔR tra due bersagli consenta di distinguere tali bersagli deve essere:

$$\Delta R \geq \frac{1}{2} \cdot l_{\text{PULSE}}$$

o, in maniera equivalente:

$$\Delta R \geq \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot c$$

Da questa relazione si vede che la **risoluzione è tanto migliore** quanto **più corti sono gli impulsi**.

Non si può pensare però di accorciare indiscriminatamente la durata degli impulsi, perché ciò comporterebbe una diminuzione dell'energia associata all'impulso e dell'energia che colpisce il bersaglio. Il segnale riflesso (eco) potrebbe pertanto indebolirsi a tal punto da non poter essere rivelato dal ricevitore.

Ricordiamo infatti che la potenza media del trasmettitore è

$$P_m = \frac{P_i \cdot \tau}{T} = P_i \cdot \frac{PW}{PRI}$$

(Con P_i = potenza media dell'impulso)

**POTERE SEPARATORE GONIOMETRICO
(o POTERE SEPARATORE ANGOLARE o POTERE SEPARATORE IN
AZIMUTH)**

È l'attitudine del radar a distinguere due bersagli posti alla stessa distanza dall'antenna, ma su traiettorie diverse.

Dipende dalla direttività dell'antenna, ma anche dalla frequenza di lavoro.

La risoluzione angolare, come del resto quella in distanza, **migliora al crescere della frequenza.**

Più esattamente essa, a parità di lunghezza dell'antenna, migliora all'aumentare della frequenza, nel senso che, per frequenze più alte, l'angolo di apertura del diagramma di irradiazione del radar diventa più piccolo.

Se, nel funzionamento di un radar, "saliamo in frequenza", lungo le bande P, L, S, X, K, otteniamo angoli di apertura del fascio via via più piccoli e quindi risoluzioni angolari migliori.

RELAZIONE FRA PRF (o PRI=T) E MASSIMA DISTANZA DEL BERSAGLIO (PORTATA TEORICA DEL RADAR)

Il PRI deve essere sufficientemente lungo (rispetto alla durata τ dell'impulso) da permettere all'eco proveniente dal bersaglio più lontano di pervenire al ricevitore prima che venga trasmesso l'impulso successivo: in questo modo non sussistono dubbi sul fatto che l'eco ricevuta sia relativa proprio all'ultimo impulso trasmesso e non ad altri.

Questa esigenza impone il rispetto di una relazione fra il valore della frequenza (e del periodo) di ripetizione degli impulsi e il valore della massima distanza radar-bersaglio.

Detta D la *distanza radar-bersaglio*¹⁸, deve essere, riguardo al periodo PRI di ripetizione dell'impulso:

$PRI \geq$ *tempo necessario a coprire la distanza radar-bersaglio e ritorno*

$PRI \geq$ (*distanza radar-bersaglio e ritorno*) / (*velocità dell'onda e.m.*)

$PRI \geq$ ($2 \cdot$ *distanza radar-bersaglio*) / (*velocità dell'onda e.m.*)

$$PRI \geq \frac{2D}{c}$$

$$D \leq \frac{PRI \cdot c}{2}$$

$$D_{MAX} = \frac{PRI \cdot c}{2}$$

$$D_{MAX} = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{PRF}$$

Da questa relazione si vede che la **distanza è tanto maggiore** quanto **minore è la PRF (e quanto maggiore è il periodo PRI)**.

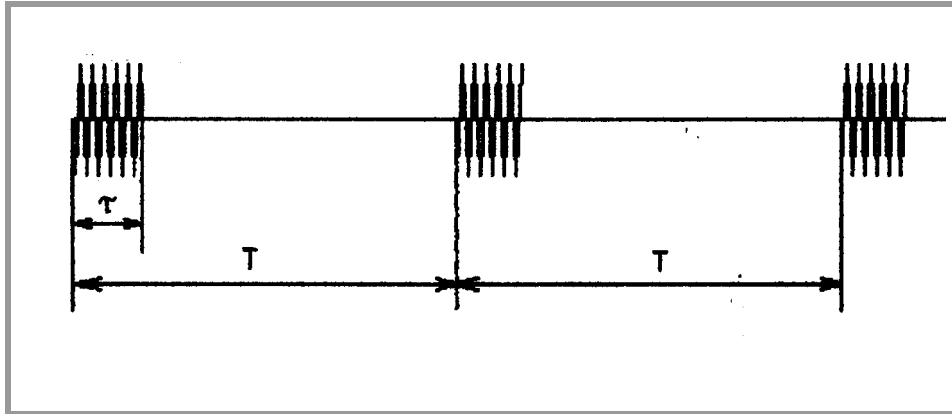
Non si può pensare però di diminuire indiscriminatamente la PRF perché ciò comporterebbe una diminuzione dell'energia associata all'impulso e dell'energia che colpisce il bersaglio. Il segnale riflesso (eco) potrebbe pertanto indebolirsi a tal punto da non poter essere rivelato dal ricevitore.

Tipicamente è: $R_{MAX} \cong$ alcune centinaia di Km

$T=PRI$ è l'intervallo di tempo che intercorre fra l'inizio di un pacchetto impulsivo e l'inizio del successivo pacchetto e quindi è il tempo che (una volta iniziato un pacchetto impulsivo) deve trascorrere prima che venga inviato il pacchetto successivo.

¹⁸ Indicata anche come D in alcuni testi, nei quali quindi si parla di D_{MAX} invece che di R_{MAX}

Da ciò si comprende che quanto più lungo è T, tanto più lontano può arrivare il pacchetto - sempre che la sua potenza glielo consenta.
 Durante il periodo T il pacchetto deve raggiungere il bersaglio e ritornare all'antenna.
 In conclusione si può dire che (ferma restando la frequenza della portante sinusoidale) al crescere di T aumenta la portata del radar.



Vediamo per esempio quanto deve valere T per poter rilevare bersagli distanti 30Km.
 Premettiamo che nel tempo T il pacchetto deve percorrere in realtà 60 Km perché deve andare al bersaglio e anche tornare. Si ha quindi:

$$\text{velocità} = \frac{\text{distanza}}{\text{tempo}}$$

$$\text{tempo} = \frac{\text{distanza}}{\text{velocità}}$$

$$T = \frac{60000 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \frac{6 \cdot 10^4}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 200 \mu\text{s}$$

Quindi, per poter rilevare bersagli lontani più di 30 Km, bisogna impostare un T maggiore di 200 μs.

PRECISIONE

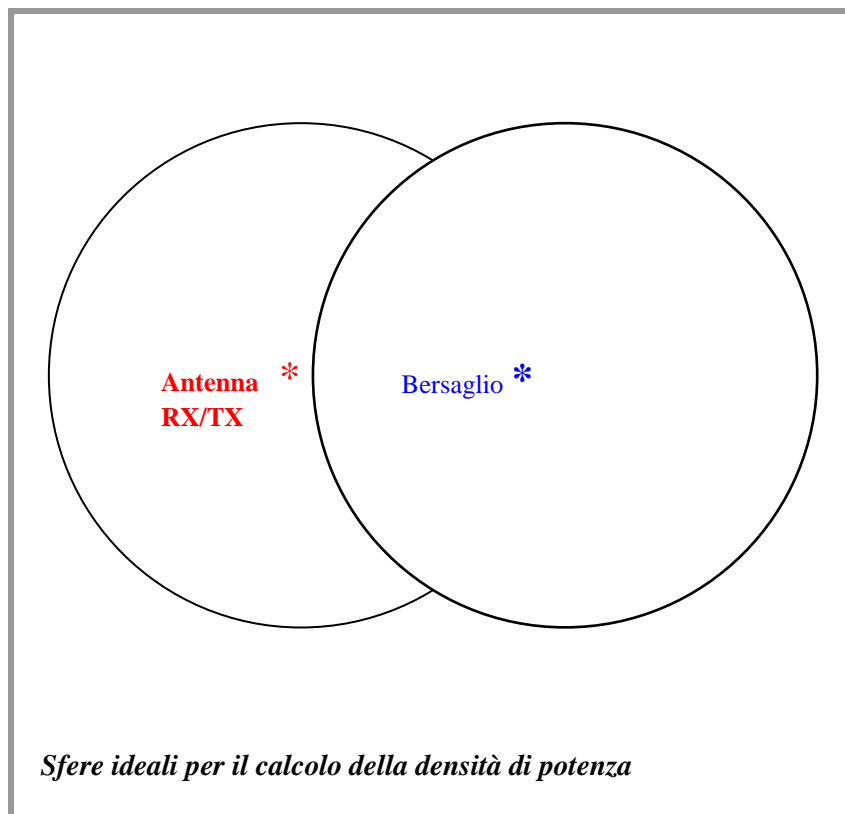
La lettura dell'indicatore è **tanto più precisa** quanto **più stretto è l'impulso** (τ piccola).

PORTATA TEORICA DEL RADAR

Per determinare la portata, cioè la massima distanza alla quale un radar può funzionare, è necessaria l'espressione della potenza captata dall'antenna ricevente, nella quale compare la distanza D del bersaglio dall'antenna.

Per ricavare l'espressione della potenza captata dall'antenna ricevente, dobbiamo determinare nell'ordine le espressioni:

- della densità di potenza S_{ISO} irradiata dall'antenna isotropica (cioè da un'antenna ideale che irradia e riceve allo stesso modo in tutte le direzioni)
- della densità di potenza S_0 irradiata dall'antenna radar
- della potenza P_r reirradiata dal bersaglio (di area efficace A_{eff})



La densità di potenza di un'antenna isotropica è:

$$S_{ISO} = \frac{P_i}{4\pi D^2}$$

dove:

Pi = potenza degli impulsi

D = distanza alla quale si misura la potenza = raggio della sfera di superficie $4\pi D^2$

Detto poi Go il guadagno di direttività dell'antenna radar si ha:

DENSITA' DI POTENZA dell' ANTENNA RADAR $S_0 = S_{ISO} \cdot G_0 = \frac{P_i}{4\pi D^2} \cdot G_0$

Di conseguenza la potenza ricevuta da un bersaglio di area trasversale A_{BERS} (posto a distanza D dall'antenna radar) risulta: $P_{BERS} = S_0 \cdot A_{BERS}$

Dobbiamo tener presente che una parte della potenza P_{BERS} ricevuta dal bersaglio viene assorbita dal bersaglio stesso (P_{ASS}), mentre la rimanente parte viene reirradiata (P_r):

$$P_{BERS} = P_{ASS} + P_r$$

La potenza "utile" è quella reirradiata (P_r), che può essere espressa in due modi

1. $P_r = \eta \cdot P_{BERS}$ con η = rendimento di reirradiazione
2. $P_r = A_{eff} \cdot S_0$ con A_{eff} = area equivalente (area efficace) o "echo area" del bersaglio

Ora, se sostituiamo nella "2" l'espressione della densità di potenza S_0 , otteniamo:

POTENZA REIRRADIATA $P_r = A_{eff} \cdot \frac{P_i}{4\pi D^2} \cdot G_0$

Dividendo questa potenza reirradiata per l'area di una sfera¹⁹ di raggio D otteniamo la

¹⁹ (centrata stavolta sul bersaglio)

DENSITA' DI POTENZA REIRRADIATA

$$S_r = \frac{P_r}{4\pi D^2} = \frac{A_{eff} \cdot \frac{P_i}{4\pi D^2} \cdot G_0}{4\pi D^2} = A_{eff} \cdot \frac{P_i}{16\pi^2 D^4} \cdot G_0$$

Se ora vogliamo determinare la **potenza P_{RX} captata dall'antenna ricevente** possiamo considerare che essa può essere espressa come prodotto dell'**area A_{ANT} dell'antenna ricevente** per la densità S_r di potenza reirradiata:

$$\text{POTENZA CAPTATA dall'ANTENNA RICEVENTE} \quad P_{RX} = A_{ANT} \cdot S_r$$

Sostituendo in essa l'espressione appena determinata di S_r otteniamo:

POTENZA CAPTATA dall'ANTENNA RICEVENTE

$$P_{RX} = A_{ANT} \cdot \frac{P_i}{16\pi^2 D^4} \cdot G_0 \cdot A_{eff}$$

Da quest'ultima relazione si può determinare la distanza massima D_{MAX} di funzionamento del radar, in altri termini la sua portata.

La distanza massima è la distanza in corrispondenza della quale la potenza captata dall'antenna ricevente scende al valore minimo accettabile P_{RXmin} (valore che deve essere determinato di caso in caso).

Se, nell'ultima espressione di P_{RX} sostituiamo

P_{RXmin} al posto di P_{RX}
 D_{MAX} al posto di D

otteniamo:

$$P_{RXmin} = A_{ANT} \cdot \frac{P_i}{16\pi^2 D_{MAX}^4} \cdot G_0 \cdot A_{eff}$$

Da cui:

$$D_{MAX}^4 = A_{ANT} \cdot \frac{P_i}{16\pi^2 P_{RXmin}} \cdot G_0 \cdot A_{eff}$$

e quindi:

PORTATA TEORICA DEL RADAR

$$D_{MAX} = \left(A_{ANT} \cdot \frac{P_i}{16\pi^2 P_{RXmin}} \cdot G_0 \cdot A_{eff} \right)^{\frac{1}{4}}$$

dove:

G_0 = guadagno di direttività dell'antenna trasmittente

A_{ANT} = area dell'antenna ricevente, che è la stessa antenna che trasmette

A_{eff} = area efficace del bersaglio

Avendo presente che l'antenna trasmittente e l'antenna ricevente coincidono e ricordando che fra l'area di un'antenna e il guadagno G_0 sussiste la relazione:

$$G_0 = \frac{4\pi A_{ANT}}{\lambda^2}$$

si ha:

PORTATA TEORICA DEL RADAR

$$D_{MAX} = \left(A_{ANT}^2 \cdot \frac{P_i}{4\lambda^2\pi P_{RX \min}} \cdot A_{eff} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (*)$$

oppure:

$$D_{MAX} = \sqrt{\frac{A_{ANT}}{\lambda}} \sqrt{\frac{P_i \cdot A_{eff}}{4\pi P_{RX \min}}} \quad (**)$$

dove:

P_i = potenza di picco degli impulsi

A_{ANT} = area dell'antenna ricevente, che è la stessa antenna che trasmette

A_{eff} = area efficace del bersaglio

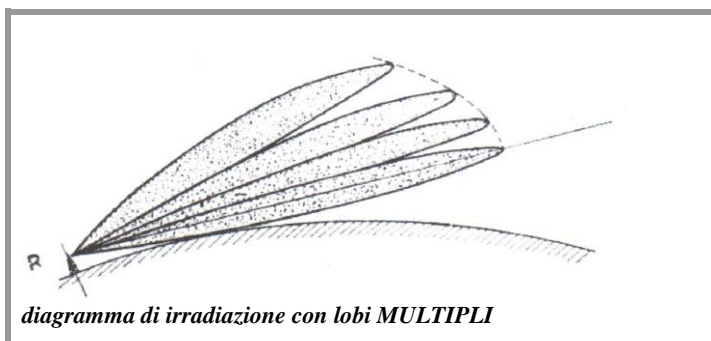
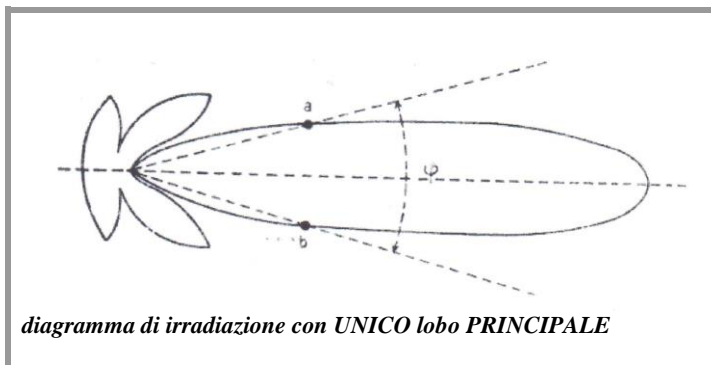
P_{Rxmin} = potenza minima necessaria in ricezione

Si può rilevare che la **portata** del radar **crece** al crescere dell'**area dell'antenna** (soprattutto), della **potenza degli impulsi** e dell'**area efficace del bersaglio**. Inoltre (per la presenza di λ al denominatore) cresce al crescere della **frequenza**.

PORTATA MASSIMA: CASI PARTICOLARI

La portata **teorica** del radar è la portata **nello spazio libero**.

Se teniamo conto non solo delle onde dirette, ma anche di quelle riflesse dalla superficie terrestre (o del mare), dobbiamo considerare che le onde riflesse, sia pure con un percorso diverso, giungono anch'esse al bersaglio. Per cui il diagramma di irradiazione dell'antenna radar si modifica passando da una configurazione a un solo lobo principale a una configurazione con lobi multipli.



Di questi lobi, il più importante per la localizzazione di bersagli marini è quello inferiore, la cui altezza, rispetto alla superficie terrestre, è:

$$h_{\text{lobo}} = \frac{D \cdot \lambda}{4 \cdot h_r}$$

dove:

D = portata

h_r = altezza dell'antenna radar

Per la localizzazione di bersagli marini è opportuno che il lobo sia basso e cioè che h_{lobo} sia piccola,

il che accade:

- al crescere della frequenza (a parità di altezza dell'antenna)
- all'aumentare dell'altezza dell'antenna (a parità di frequenza)

Da quanto detto si comprende che, per la **localizzazione di oggetti bassi sul mare**, è opportuno usare **onde più corte**, ossia **frequenze più alte**.

Se, per **effetto della riflessione**, il diagramma di radiazione dell'antenna radar presenta **molteplici lobi**, allora la **portata Dmax**, data dalla (*) e dalla (**), **raddoppia**, diventando:

$$D_{\text{MAX}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\text{ANT}}}{\lambda}} \sqrt{\frac{P_i \cdot A_{\text{eff}}}{4\pi P_{\text{RX min}}}}$$

ORIZZONTE e CONTATTO RADAR

La **portata teorica del radar**, ossia l'**equazione del radar**, è **valida** per lo **spazio libero**.

Vi sono perciò delle limitazioni alla portata soprattutto nel caso di bersagli di superficie. La curvatura terrestre influisce sulla portata di radar dotati di antenne di altezza non grande. Pertanto l'effettiva distanza di lavoro del radar è data dall'orizzonte radar e non dalla portata massima.²⁰

L'espressione dell'orizzonte radar, indicato come "d" o come "r" è:

- **in BANDA X e in MIGLIA nautiche:**

$$d = 2,23 \cdot (\sqrt{H_x} + \sqrt{h_y})$$

dove²¹:

- 2,23 = coefficiente di rifrazione o coefficiente di propagazione
- H_x = altezza, **in metri**, rispetto alla superficie terrestre, dell'antenna del radar di bordo
- h_y = altezza, **in metri**, rispetto alla superficie terrestre, del bersaglio

- **in BANDA X e in chilometri:**

$$d = 4,13 \cdot (\sqrt{H_x} + \sqrt{h_y})$$

²⁰ La diffrazione tuttavia può far superare l'orizzonte geometrico alle onde radar permettendo loro di seguire la curvatura terrestre, fenomeno questo che è tanto più rilevante quanto più bassa è la frequenza

²¹ Il **miglio nautico** corrisponde alla lunghezza di un primo di arco su un circolo massimo, ad esempio i meridiani o l'Equatore.

Un circolo massimo contiene $360^\circ \times 60' = 21600'$ ed esiste quindi una correlazione tra la circonferenza della sfera terrestre e la lunghezza del miglio nautico:

(1 Mg = circonferenza/21600). In realtà abbiamo visto che la Terra non è perfettamente sferica, anche per lo schiacciamento ai poli, e quindi è stata assunta come misura standard convenzionale del **miglio nautico** la lunghezza di un primo di arco del meridiano del geoide alla latitudine di $44^\circ 20'$ pari a **1852** metri.

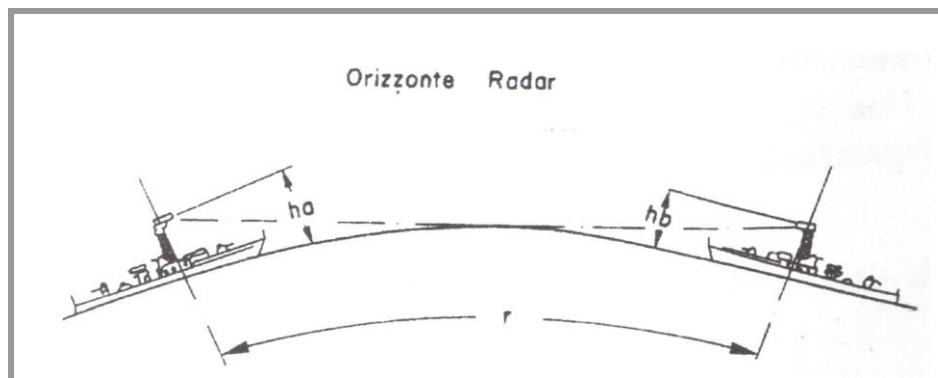
dove:

- H_x = altezza, **in metri**, rispetto alla superficie terrestre, dell'antenna del radar di bordo
- h_y = altezza, **in metri**, rispetto alla superficie terrestre, del bersaglio

Se il radar lavora in bande diverse dalla banda X, il **coefficiente di rifrazione o propagazione** assume valori diversi da 2,23.

In **banda S** per esempio (e cioè a frequenze più basse,) il coefficiente assume valori più alti, che possono arrivare **fino a circa 4,46**.

Al diminuire della frequenza di funzionamento del radar, l'orizzonte si "allunga" perché, con l'abbassamento della frequenza, diventa più rilevante la possibilità che le onde elettromagnetiche seguano la curvatura terrestre.



Se conosciamo la misura in miglia nautiche, possiamo convertirla in Km moltiplicando per 1,852= 1852/1000

$$d(Km) = d(miglia) \cdot 1,852$$

Viceversa, se conosciamo la misura Km, possiamo convertirla in miglia nautiche dividendo per 1,853= 1853/1000:

$$d(miglia) = \frac{d(Km)}{1,852}$$

$$d(miglia) = d(Km) \cdot 0,54$$

*L'orizzonte "d" è una distanza **massima** di funzionamento.*

***Per distanze maggiori** dell'orizzonte "d", il radar **non** funzionerebbe
(nave e bersaglio sarebbero "sovrastati" dalla curvatura terrestre).*

*Per una fissata frequenza del segnale radar, l'orizzonte si "**allunga**" al **crescere**
dell'**altezza** dell'antenna e/o dell'altezza del bersaglio.*

*Inoltre, per un fissato valore delle altezze dello scanner e del bersaglio, l'orizzonte si
"allunga" al diminuire della frequenza.*

FORMULA “PRATICA” PER IL CONTATTO RADAR E LA RISOLUZIONE IN DISTANZA

Definiamo la lunghezza spaziale effettiva dell'impulso radar come:

$$l'_{pulse} = 12 \cdot \frac{\tau}{S}$$

con:

τ = durata temporale dell'impulso

S = lunghezza, in **miglia nautiche**, della **SCALA** adottata

Diciamo poi d_{spot} il **diametro dello spot**, ossia della macchia luminosa del display, la relazione pratica che individua la distanza minima effettiva che dovrebbero avere due ostacoli puntiformi per essere individuati distintamente sullo schermo è:

$$d_{prat} = \Delta R_{prat} = 12 \cdot S \cdot (d_{spot} + l'_{pulse})$$

Dalla relazione si vede che la risoluzione migliora (il suo valore numerico diventa più piccolo) adottando scale più piccole.

CONSIDERAZIONI GENERALI SULLA FREQUENZA DI LAVORO DI UN RADAR A IMPULSI

La **FREQUENZA di lavoro del radar** dovrebbe, in generale, essere **quanto PIU' ELEVATA possibile** (e quindi la lunghezza d'onda λ dovrebbe essere piccola) per questi motivi:

1. perché, a parità di altre condizioni, l'**antenna** parabolica risulta **tanto più direttiva** (il che significa che il diagramma di irradiazione è più stretto e il guadagno d'antenna più elevato) **quanto più alta è la frequenza**
2. perché l'energia riflessa dal bersaglio, e quindi la **potenza P_r reirradiata dal bersaglio, cresce con il quadrato della frequenza** e *decrece con il quadrato della distanza*, il che significa che **bisogna compensare con frequenze altissime di lavoro la diminuzione di potenza dovuta alle grandi distanze**; infatti l'espressione della potenza reirradiata è:

$$P_r = A_{eff} \cdot \frac{P_i}{4\pi D^2} \cdot G_0$$

e, sostituendo in essa l'espressione del guadagno:

$$G_0 = \frac{4\pi A_{ANT}}{\lambda^2}$$

si ha:

$$P_r = \frac{4\pi A_{ANT} \cdot P_i \cdot A_{eff}}{4\pi \cdot D^2 \cdot \lambda^2}$$

$$P_r = \frac{A_{ANT} \cdot P_i \cdot A_{eff} \cdot f^2}{D^2 \cdot c^2}$$

$$\text{con : } c = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$$

3. perché la **portata D_{MAX} del radar** è decrescente con la lunghezza d'onda e quindi **cresce con la frequenza**:

$$D_{MAX} = \left(A_{ANT}^2 \cdot \frac{P_i}{4\lambda^2 \pi P_{RX \min}} \cdot A_{eff} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Tuttavia non è opportuno utilizzare **indiscriminatamente** frequenze di lavoro altissime perché, al crescere di f , aumentano le perdite per assorbimento atmosferico.

La scelta della frequenza va fatta caso per caso a seconda del tipo di radar e della sua utilizzazione.

Le frequenze utilizzate dai radar a impulsi sono comprese fra alcune centinaia di MHz e il centinaio di GHz e sono suddivise nelle 5 bande della tabella seguente:

Sigla	frequenze (MHz)	λ (cm)
P	225 ÷ 390	133 ÷ 77
L	390 1550	77 19,35
S	1550 5200	19,35 5,77
X	5200 11.000	5,77 2,73
K	11.000 33.000	2,73 0,91

ANTENNA O SCANNER RADAR

LARGHEZZA DEL FASCIO D'ANTENNA E DIMENSIONI DELL'ANTENNA

Un fascio d'antenna (ossia un diagramma di irradiazione) stretto comporta una maggiore concentrazione della potenza nella direzione desiderata e una maggior risoluzione angolare.

In generale si ha:

$$\text{largh. fascio} = \frac{\text{lunghezza d'onda del segnale } (\lambda)}{\text{dimensione (diametro *) dell' antenna}}$$

* Il diametro figura nel caso di antenne circolari. Se l'antenna è rettangolare si considera la base o l'altezza

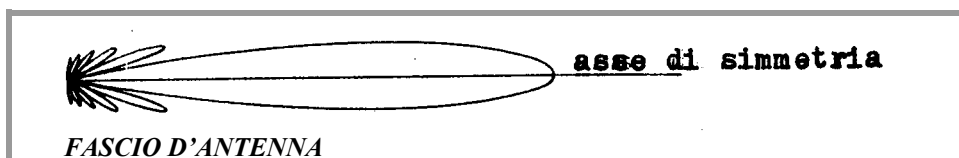
Pertanto, a parità di dimensioni dell'antenna si ha:

λ crescente \rightarrow f decrescente \rightarrow fascio più largo

λ decrescente \rightarrow f crescente \rightarrow fascio più stretto

Data quindi un'antenna di fissate dimensioni, il fascio risulta tanto **più STRETTO** quanto **PIU' ALTA** è la **FREQUENZA**

Se invece fissiamo una frequenza (e quindi una lunghezza d'onda) il fascio risulterà tanto più stretto quanto maggiore è la dimensione dell'antenna.



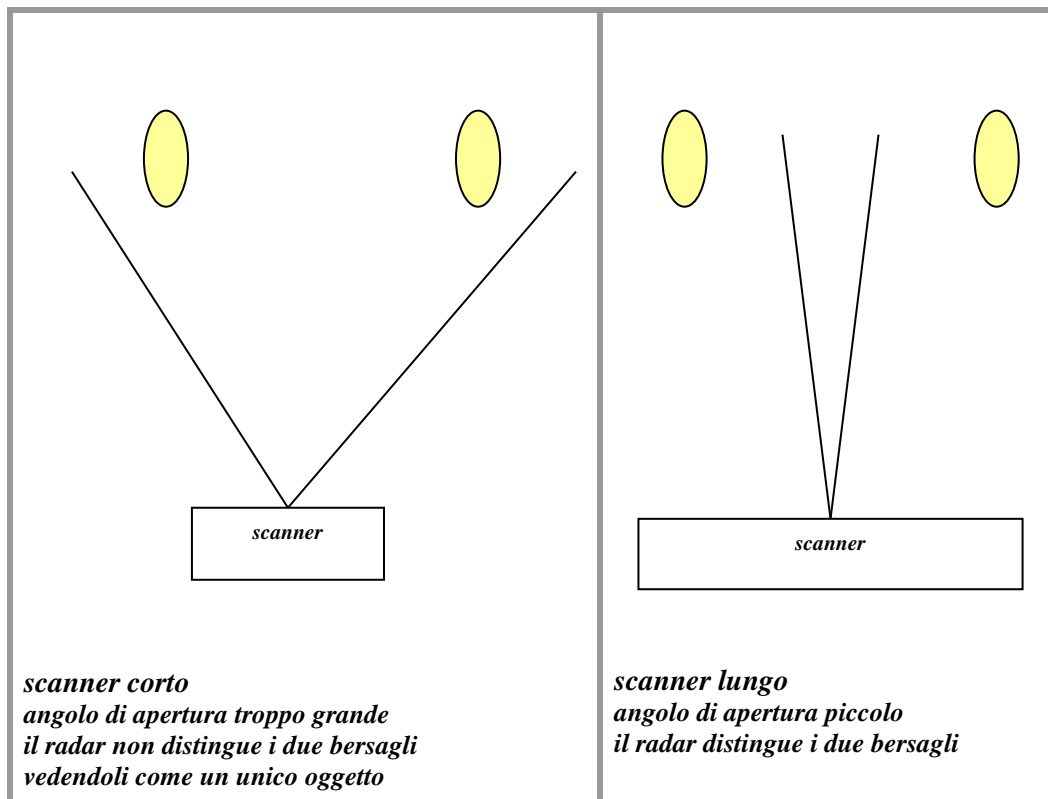
ANTENNA O SCANNER RADAR

È un'antenna **rotante**, spesso chiamata “scanner”

Nei radar più piccoli è protetta da una **cupola** di plastica detta “**radome**”.

Dalla lunghezza dello scanner dipende, a parità di frequenza, l'apertura orizzontale del lobo principale del diaframma di irradiazione.

Più lungo è lo scanner, più piccolo è l'angolo di apertura orizzontale del lobo e migliore è la risoluzione goniometrica.



A parità di frequenza, l'angolo di apertura diminuisce all'aumentare della lunghezza dell'antenna e quindi del diametro della cupola protettiva.

Vediamo alcuni esempi:

Diametro radome in metri	Diametro radome in piedi	angolo di apertura orizzontale del lobo
0,46	1,5	6°
2,13	7	1,1°
2,74	9	0,9°

ALTEZZA DELLO SCANNER

A parità di apertura del lobo principale del diagramma di radiazione, all'**umentare** dell'**altezza** dello scanner

- la **distanza minima** alla quale può essere avvistato il bersaglio **umenta** (fatto **negativo**)
- la **portata**, ossia la distanza massima alla quale può essere avvistato il bersaglio **umenta** (fatto **positivo**).

ROTAZIONE DELLO SCANNER

A ogni rotazione di 360° dello scanner corrisponde un'esplorazione completa dell'orizzonte che circonda il radar.

All'umentare della velocità²², il numero di impulsi che colpiscono il bersaglio diminuisce e diminuisce anche l'energia dell'eco che torna al ricevitore.

Perciò, generalmente, quando aumenta la velocità di rotazione dell'antenna, viene aumentato il numero di impulsi al secondo.

È opportuno che la velocità di rotazione sia elevata quando lo scenario attorno alla barca può cambiare rapidamente, come nella navigazione in acque interne.

È invece adottata una velocità più bassa per l'avvistamento a grande distanza (navi da guerra).

LUNGHEZZA D'ONDA DI TAGLIO

$$\lambda_T = 2 \cdot a$$

È la lunghezza d'onda limite dovuta alla dimensione orizzontale della guida d'onda che collega il trasmettitore all'antenna.

²² Valore tipico: 24 r.p.m. (rotazioni per minuto)

CLUTTER PER EFFETTO DEI FENOMENI ATMOSFERICI E DEL MOTO ONDOSO

Con il termine “**clutter**” è indicato un **eco radar indesiderato**.

FENOMENI ATMOSFERICI

La presenza nell’atmosfera di gocce di pioggia, chicchi di grandine, ghiaccio, fiocchi di neve determina il fenomeno di diffusione delle onde centimetriche e di conseguenza:

- echi radar indesiderati (rain clutter)
- attenuazione delle onde e.m. attraverso la precipitazione.

Le precipitazioni meteorologiche possono **mascherare**, ossia coprire i **bersagli marittimi**, effetto che è tanto **maggiore** quanto più **alta** è la **frequenza** (quanto minore è la lunghezza d’onda).

Sul display radar si hanno effetti di mascheramento del bersaglio quando la **superficie equivalente** (area efficace della **meteora**, ossia dalla zona di precipitazioni atmosferiche), è **maggiore** o uguale alla superficie equivalente del bersaglio.

Gli apparati radar prevedono un comando “**anti clutter rain**” per ridurre l’eco delle precipitazioni sul display. Il comando agisce sull’amplificatore video del monitor.



MOTO ONDOSO

Gli apparati radar prevedono un comando “**anti clutter sea**” per ridurre l’effetto del moto ondoso sul display, che si manifesta come una cortina di disturbi attorno al centro dello schermo.

L’azione “anti clutter sea” consiste in una **diminuzione**, per un breve intervallo di tempo dopo l’invio dell’impulso di trasmissione, dell’**amplificazione (gain) o della sensibilità del ricevitore**.

Siccome il disturbo **più consistente** è quello proveniente dalle **brevi distanze**, la diminuzione del guadagno del ricevitore (e in particolare dell’amplificatore a frequenza intermedia) o della sensibilità subito dopo l’emissione degli impulsi fa in modo che gli echi provenienti da breve distanza, contenenti il disturbo, vengano amplificati meno di quelli provenienti da lontano e non affetti da disturbo.



**antidisturbo mare “massimo”
(ANTI-CLUTTER SEA MAXIMUM)**



**antidisturbo mare “minimo”
(ANTI-CLUTTER SEA MINIMUM)**

GUADAGNO



Dal guadagno, o “amplificazione”, del ricevitore radar dipende la sensibilità del ricevitore.
Quanto più piccolo e lontano è il bersaglio che si vuole visualizzare, tanto maggiore deve essere il guadagno.

SINTONIA



Attualmente la sintonia è spesso regolata automaticamente dallo strumento stesso.
Dalla sintonia dipendono il numero e l'intensità degli echi visualizzati, cioè la ricchezza dell'immagine.

FUNZIONI DEL DISPLAY

SCALA

Per “scala” si intende la massima distanza di avvistamento per la quale il radar viene impostato in un certo momento.

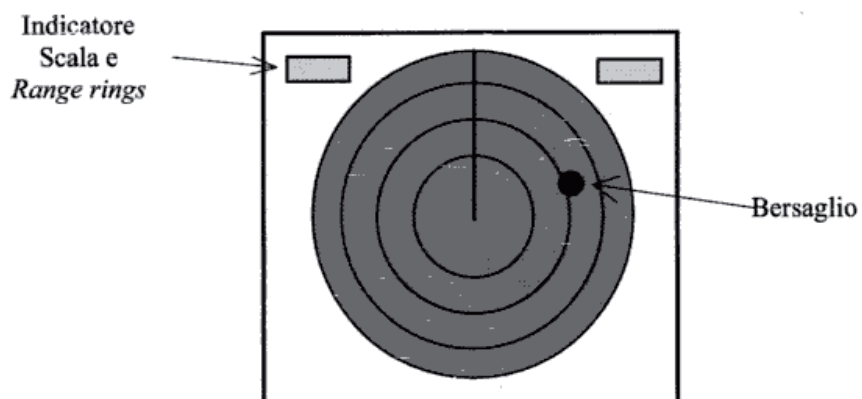
Sul display la scala rappresenta quindi il valore in miglia o in Km della lunghezza del raggio del display stesso.

RANGE RINGS (CERCHI DI DISTANZA)

Sono anelli concentrici al punto nave, visualizzabili sul display, i quali permettono di determinare la distanza dell'imbarcazione su cui si trova il radar (punto-nave) dal bersaglio prescelto.

Quando i range rings sono attivati, su una finestrella del monitor è indicata la distanza fra il punto nave e il primo anello, coincidente con la distanza fra tutte le coppie di anelli consecutivi.

Se per esempio il valore dei range rings è di 5 miglia, tutti i bersagli che si trovano all'interno del primo anello distano dal punto-nave di 5 miglia al massimo.



VRM

MARCATORE MOBILE DI DISTANZA

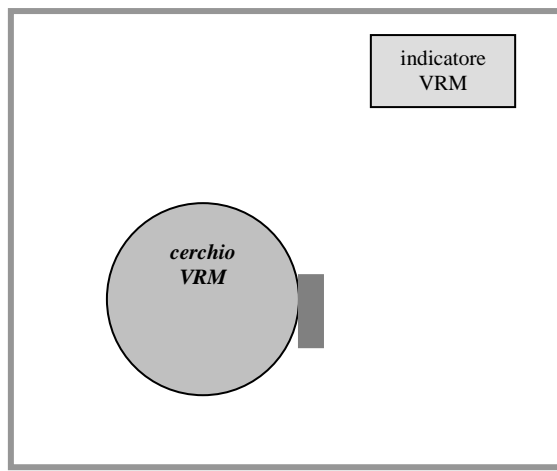
(VARIABLE RANGE MARKER)

E' un cerchio luminoso tratteggiato che, su comando, appare sul display del radar, insieme a un indicatore di distanza.

Il centro del cerchio rappresenta generalmente la posizione della nave sulla quale si trova il radar, mentre il raggio viene regolato dall'operatore.

Per esempio, si può fissare la lunghezza del raggio in modo che il cerchio tocchi un bersaglio.

In questa situazione l'indicatore indica la distanza dal bersaglio.



RADAR ARPA

RADAR a ELABORAZIONE AUTOMATICA dei DATI

(AUTOMATIC RADAR PLOTTING²³ AID)

Sono detti ARPA i radar forniti di un piccolo elaboratore che:

- effettua il **plotting**, cioè la **determinazione** della “vera” **rotta** e della “vera” **velocità del bersaglio**, le quali –servendosi della normale rappresentazione radar- potrebbero essere ricavate soltanto fermando la propria imbarcazione
- fornisce il **CPA**, ossia la **distanza minima di passaggio** (Closest²⁴ Point of Approach)
- fornisce il **TCPA**, ossia il **tempo di passaggio alla distanza minima** (Time Closest Point of Approach)

CPA (DISTANZA MINIMA DI PASSAGGIO)

E' la minima distanza dal punto-nave alla quale passa un oggetto in movimento. Ricordiamo che il punto-nave è la posizione dell'imbarcazione su cui si trova il radar.

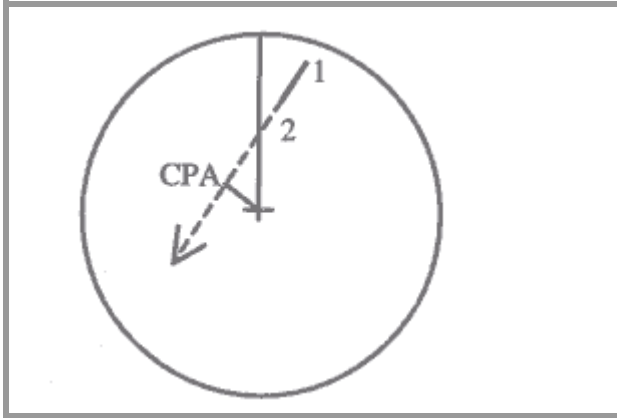
Supponiamo che l'oggetto in movimento appaia sul display prima nel punto 1 e poi nel punto 2 .

La minima distanza dalla nave alla quale passerà l'oggetto descrivendo la sua traiettoria si determina in questo modo

- ❖ si uniscono i punti 1 e 2 e si prolunga la retta 12
- ❖ dal punto-nave si traccia la perpendicolare alla retta
- ❖ il segmento di perpendicolare compreso fra il punto-nave e la retta è la CPA

²³ tracciamento

²⁴ più vicino



La CPA può essere determinata anche con la VRM: basta regolare il diametro della circonferenza VRM in modo che la circonferenza risulti tangente alla retta 1-2 che descrive la traiettoria del bersaglio.

SAR RADAR AD APERTURA SINTETICA

Il radar ad apertura sintetica (SAR):

- è basato su un **radar convenzionale**, funzionante a frequenze comprese fra 500 MHz e 10 GHz
- è alloggiato su una **piattaforma mobile** (aeromobile o satellite²⁵) in modo che **l'antenna risulti in movimento**
- sottopone il segnale ricevuto a una particolare **elaborazione** mediante computer.

L'immagine elettromagnetica fornita dal radar SAR ha una risoluzione spaziale di qualche metro.

La capacità di un radar di fornire immagini dettagliate di un oggetto è tanto maggiore quanto più grande è l'antenna rispetto alla lunghezza d'onda del segnale riflesso dal bersaglio.

In altri termini la risoluzione ottenibile dal radar è tanto migliore, quanto più grande è il rapporto:

$$\frac{\text{dimensione dell' antenna}}{\text{lunghezza d'onda del segnale riflesso dal bersaglio}}$$

Paragonando la pupilla dell'occhio all'antenna radar possiamo dire che l'occhio è in grado di fornire un'immagine dettagliata degli oggetti perché la pupilla è molto più grande della lunghezza d'onda della luce.

Come si potrebbe migliorare l'immagine radar senza aumentare le dimensioni dell'antenna?

Una tecnica consiste nell'utilizzare **antenne in movimento** e nell'**elaborare il segnale ricevuto durante il movimento** (i radar basati su di essa sono chiamati "**ad apertura sintetica**").

Il segnale derivante da un'antenna in movimento è paragonabile al segnale proveniente da un'antenna più grande: si può dire, a questo proposito, che **il calcolatore del radar SAR sintetizza (cioè "simula") un'antenna molto più grande di quella effettiva, elaborando opportunamente i dati ottenuti durante il movimento dell'antenna fisica.**

²⁵ Ma anche su navi, dove sono riconoscibili dall'antenna trapezoidale.