

CAPITOLO I.

Principi di funzionamento di un RADAR OTH (Over The Horizon).

1.1 Cenni storici.

Nonostante spesso si usi associare mentalmente la parola Radar a una trasmissione di segnali a microonde, i primi sistemi di localizzazione tramite eco di ritorno furono le sonde ad alta frequenza (High Frequency) usati negli anni '20, da Breit e Tuve, per misurare l'altezza della ionosfera, definita "specchio nel cielo" dai fisici inglesi Edward Appleton e Miles Bennett, proprio per la sua capacità di riflettere onde a bassa frequenza. I primi radar sperimentati e installati alla fine degli anni '30 dagli inglesi per la rivelazione di aerei nemici (radar *Chain Home*) e, successivamente, dei missili V-2 tedeschi, lavoravano a frequenze che possiamo localizzare nella parte alta della gamma di frequenze HF (Frequenze dai 3 MHz ai 30 MHz, ovvero lunghezze d'onda da 100 ai 10 m) e questo anche perché la tecnologia grossolana dell'epoca non permetteva di utilizzare lunghezze d'onda minori. Potremmo quindi dire che i radar OTH abbiano iniziato a essere sviluppati a partire da quegli anni.

Tuttavia con l'avvento di tecnologie più avanzate che permettevano ai radar di lavorare con frequenze sempre più alte, che consentivano una buona discriminazione dell'eco radar rispetto al "clutter" ambientale, si tese a mettere da parte il progetto di un radar HF OTH. Questo era anche dovuto al fatto che i progetti per i radar HF partiti alla fine della seconda guerra mondiale, per aumentare il raggio di azione dei radar "tradizionali", se così vogliamo chiamarli, tramite riflessione ionosferica, produssero dei risultati disastrosi in quanto all'epoca non si disponeva di adeguati mezzi che riuscissero a discriminare bersagli immersi nel clutter. Alla metà degli anni '50 molti di questi progetti furono di fatto abbandonati anche perché si riteneva che non ci fossero minacce che richiedessero sensori a così lungo raggio.

Più o meno nello stesso periodo, però, il crescente interesse nelle nuove tecniche di signal-processing e l'incremento delle tecnologie applicate ai radar, portarono allo sviluppo dei filtri

adattati, studiati appunto per ottenere un elevato rapporto segnale rumore, unitamente a un'elaborazione coerente dei tempi di durata di molti secondi. La combinazione di questi due fattori permise l'elaborazione di filtri Doppler con ampiezze di banda dell'ordine delle frazioni di hertz.

A causa della grossolana risoluzione in distanza dei radar HF, infatti, è necessario fare affidamento su filtri Doppler molto selettivi per separare tra di loro i bersagli sulla base di lievi differenze delle rispettive velocità.

Il livello della tecnologia negli anni '50 era talmente insufficiente che i soli componenti disponibili capaci di realizzare quanto detto poc'anzi, lavoravano al massimo nella banda HF che consentiva, tuttavia, di incrementare la distanza di rilevamento utilizzando la riflessione ionosferica. Per problemi principalmente dovuti all'elaborazione del segnale la comunità scientifica era contraria al prosieguo delle ricerche in tale ambito. Tuttavia, malgrado questa tendenza generale e malgrado le riconosciute problematiche pratiche di messa in opera, i primi esperimenti effettuati dimostrarono che il radar OTH in banda HF era fattibile.

La U.S. Naval Research Laboratory continuò la sua ricerca, disegnando e costruendo nel 1961, un radar sperimentale, senza componenti digitali, che usava esclusivamente tubi a vuoto e componenti analogici, e che richiedeva abilità particolari per operare.

Il segreto del successo e della successiva ampia utilizzazione di questo radar risiedeva nello sfruttamento dell'elaborazione Doppler dell'eco ricevuta. I componenti analogici usati per l'elaborazione del segnale, però, ne limitavano l'utilizzo esclusivamente per bersagli aerei, in quanto le navi erano troppo lente per determinare una variazione rivelabile di frequenza Doppler: difatti bersagli troppo lenti venivano confusi con il clutter, che le limitate conoscenze tecnologiche dell'epoca non permettevano di eliminare finemente.

Dopo di questo altri esperimenti seguirono. Solo a partire dai primi anni '70 alcuni di questi riuscirono a mostrare appieno le capacità operative dei radar HF-OTH di rivelare missili balistici, rivelare e tracciare aerei e navi, e di tracciare con buona precisione le tempeste oceaniche [1,2].

1.2 Principi di funzionamento di un radar HF.

Fondamentalmente, il radar OTH è capace di “vedere” oltre la linea dell'orizzonte perché sfrutta gli strati ionosferici per riflettere le sue onde sulla terra. Mentre i radar convenzionali, infatti, sfruttano frequenze che vanno dai 200 ai 40000 MHz, frequenze che “bucano” la ionosfera, propagandovisi attraverso, le onde a più basse frequenze del radar OTH (comprese tra 3 e 30 MHz), interagiscono con essa, creando uno specchio virtuale, e venendo riflesse a distanze comprese tra 500 e 2000

miglia nautiche (1 miglio nautico = 1,852 Km); in tal modo, usando frequenze diverse, si ha l'estensione del raggio d'azione (fig. 1.1).

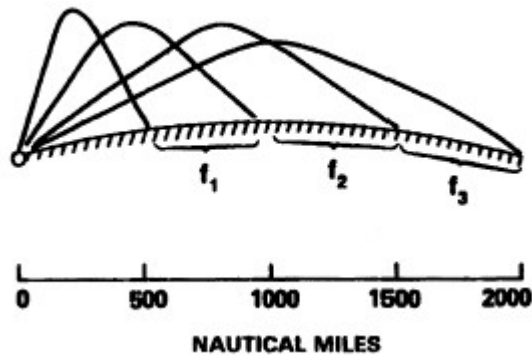


Figura 1.1. Percorsi delle onde radar HF.

Alle frequenze della banda HF anche le onde superficiali hanno la loro utilità. Infatti una polarizzazione verticale di tali onde permette una illuminazione della superficie che va ben oltre l'orizzonte ottico, se la superficie sulla quale tali onde si propagano è sufficientemente conduttiva, come ad esempio la superficie del mare. In questo ambito si stanno studiando soluzioni per una installazione navale che permetta rivelazione di missili, di aerei, navi e un'analisi delle condizioni marine per portate che possono arrivare alle 400 miglia marine.

Come tutte le innovazioni tecnologiche, il radar OTH presenta qualche svantaggio. Infatti, avendo a che fare con lunghezze d'onda dell'ordine delle decine di metri (da 10 a 100 metri), le antenne utilizzate sono estremamente estese, 100 metri o più in lunghezza. La risoluzione spaziale ottenibile da un singolo elemento radiante è relativamente grezza, si parla dell'ordine del chilometro, rispetto alle risoluzioni dell'ordine delle decine di metri ottenibili con i radar a microonde.

Se volessi disporre di celle di risoluzione in azimuth ragionevoli, dovrei operare con schiere di elementi che in linea di massima possono raggiungere lunghezze di diverse migliaia di metri (ad esempio il radar ROTHRA americano ha un'antenna in ricezione lunga 2.7 Km e presenta una risoluzione di mezzo grado in azimuth lavorando ad una frequenza di 15 MHz). Considerando inoltre che la soluzione più comune prevede trasmissioni ad onda continua, questo implica, per necessità, due schiere distinte di antenne, generalmente poste a distanze dell'ordine delle centinaia di chilometri, in modo da garantire la minima interferenza possibile (fig. 1.2).

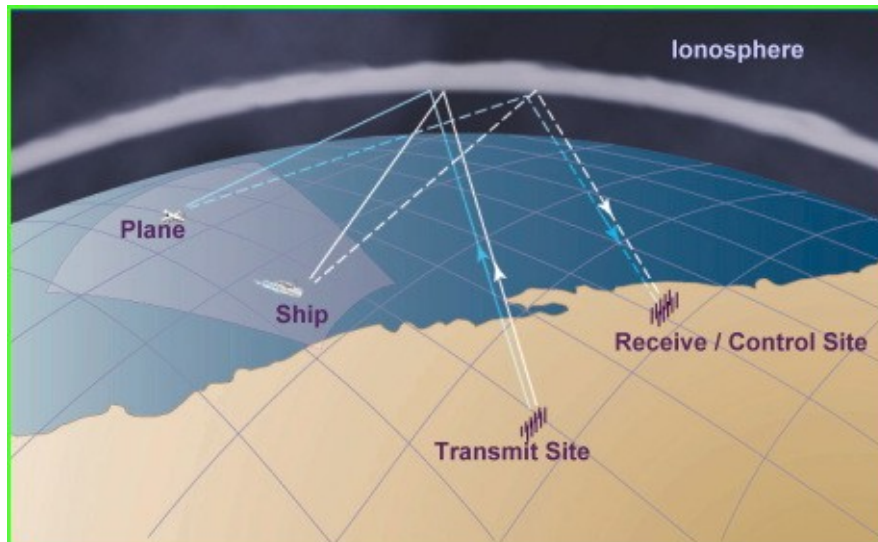


Figura 1.2. Principio di funzionamento un radar OTH.

In quest'ottica, sebbene questa soluzione sia da preferire in quanto permette di utilizzare potenze inferiori in trasmissione, non è da trascurare l'impatto ambientale, che per uno stato piccolo come l'Italia sarebbe enorme, sia a causa dell'orografia del territorio sia a causa dell'elevato tasso di urbanizzazione: non a caso il sistema radar OTH Jindalee australiano è sito nel deserto.

Altro inconveniente è che la banda delle frequenze operative utilizzate è densamente occupata da altri servizi, come ad esempio le trasmissioni radio a onde corte e le comunicazioni amatoriali. Per questo motivo è necessaria una costante ricerca di canali disponibili da poter usare per evitare interferenze di base. Questa operazione è svolta da un analizzatore di spettro. Le performance di un radar OTH sono limitate, oltre che da questi inconvenienti, anche da rumore di fondo e da un ampio clutter Doppler. Le due componenti primarie del rumore di fondo sono una atmosferica (fulmini) e l'altra prodotta dall'uomo (linee elettriche, comunicazioni radio amatoriali, ecc.). La *International Radio Consultative Committee* [1964] fornì una dettagliata descrizione dei rumori di fondo che disturbano un radar HF.

Per quanto riguarda il clutter, poiché il radar OTH guarda la superficie terrestre dall'alto della ionosfera, un ampio eco di ritorno proveniente dalla terra e dal mare va a mescolarsi con il segnale utile proveniente dal bersaglio. Mentre il clutter di terra è facilmente eliminabile mediante un filtraggio opportuno, il clutter di mare può mescolarsi al segnale utile proveniente, ad esempio, da una imbarcazione. Infatti quando la lunghezza tra due creste d'onda del mare è comparabile con la lunghezza dell'onda e.m. incidente, insorgono fenomeni di risonanza noti come *Bragg's effect*.

Sebbene questo fenomeno sia compensabile ricorrendo a un utilizzo congiunto di più frequenze, d'altra parte esso permette di monitorare le onde marine per ottenere una diagnostica sia delle correnti marine che dei venti che lambiscono la superficie del mare.

Allo stesso modo, navi e grandi aerei hanno dimensioni che cadono nella regione di risonanza e finché questi mezzi si muovono, la loro presenza può essere rivelata misurando la differenza di frequenza (effetto Doppler) tra la portante e l'onda da essi riflessa.

Un'altra complicazione è dovuta ai continui cambiamenti della densità dei diversi strati ionosferici, per cui la frequenza operativa del radar e la forma d'onda trasmessa va continuamente adattata. Nonostante le condizioni della ionosfera siano in media prevedibili su periodi di tempo lunghi, variazioni a breve termine possono avvenire in maniera inaspettata e possono causare errori di decisione. Per avere una misura in tempo reale delle distorsioni del canale ionosferico, si utilizzano alcuni sensori dedicati necessari ad un corretto funzionamento del sistema radar: i Quasi Vertical Incidence (QVI) e le ionosonde verticali. In alcune circostanze, invece, è il radar stesso a fornire gli elementi necessari alle operazioni di gestione delle frequenze tramite un'operazione di sondaggio obliquo (back-scattering oblique incidence). A tutto questo sistema vengono affiancati, come riferito sopra, dei modelli di previsione delle condizioni atmosferiche, che hanno raggiunto una elevata complessità. Quanto detto può essere schematicamente riassunto nel seguente schema a blocchi:

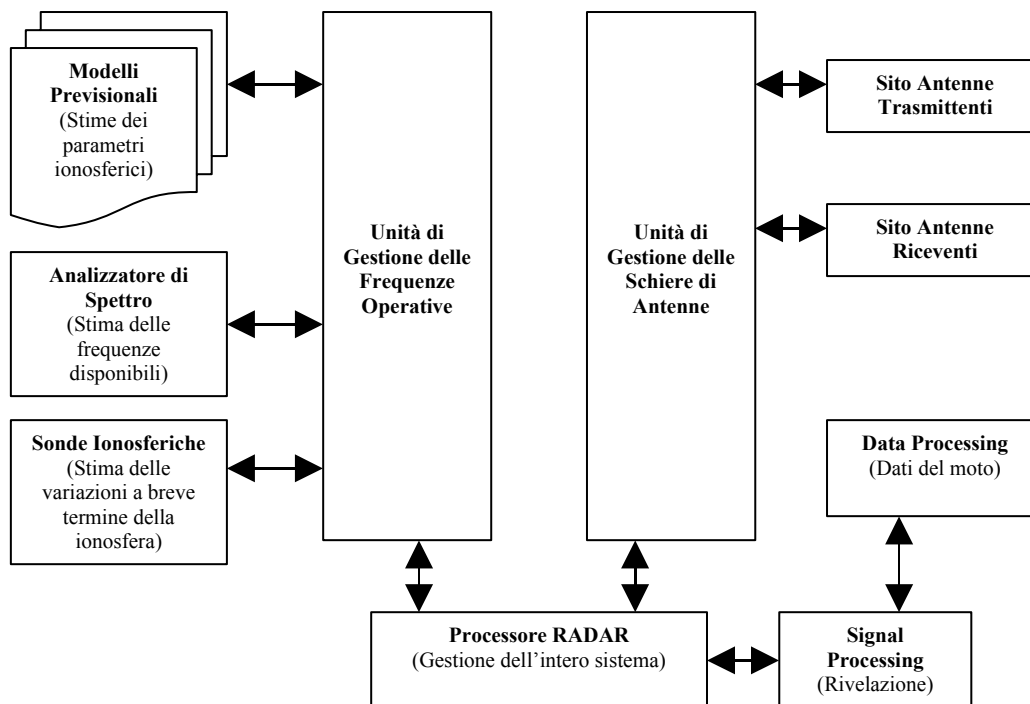


Figura 1.3. Schema a blocchi di un radar HF.

Tra gli altri vantaggi elencati in precedenza non è da trascurare la possibilità di rivelare, tramite questi radar, bersagli con tecnologia stealth i quali sono stati studiati per risultare invisibili ai comuni radar a microonde. Infatti molte tecniche di riduzione della radar cross-section e l'uso di vernici ad alto assorbimento, sono stati studiati in funzione delle frequenze operative dei radar a microonde. Tali tecniche, usate per ingannare i radar a microonde, possono non essere applicabili per onde HF in quanto tali accorgimenti dovrebbero essere riportati a scale da 100 a 1000 volte più grandi [1,2,3,4].

1.3 Le onde corte e la ionosfera.

Ipotizzando una sorgente di campo elettromagnetico (e.m.) posta sulla superficie terrestre che irradia con la stessa intensità in tutte le direzioni, ad esempio un'antenna trasmittente isotropa, le radioonde emesse possono giungere ad una antenna ricevente seguendo uno o più dei possibili percorsi schematizzati in figura 1.4.

Di questi alcuni avvengono nello spazio libero, altri in prossimità del suolo o sotto la sua influenza.

Da ciò deriva la suddivisione delle onde in:

1. onde terrestri (*ground waves*);
2. onde celesti o ionosferiche (*sky waves*).

Le prime a loro volta si suddividono in:

- a. onde di superficie;
- b. onde dirette;
- c. onde riflesse dal suolo.

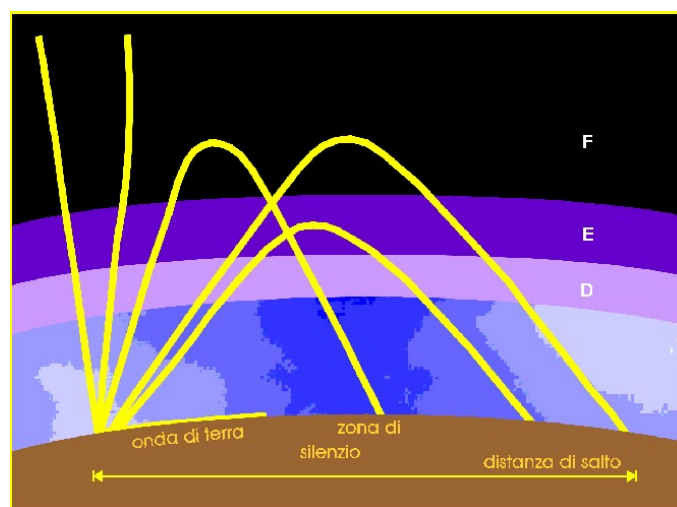


Figura 1.4. Percorsi delle onde e.m. al variare della frequenza.

A parità di distanza tra trasmettitore e ricevitore, della configurazione del terreno, di altezza delle antenne, ecc., i percorsi preferenziali di propagazione dipendono dalla frequenza della radiazione elettromagnetica.

La figura 1.4 rappresenta pertanto un quadro complessivo dei possibili percorsi delle radioonde; a seconda però delle bande di frequenza impiegate, alcuni tipi di propagazione saranno esaltati mentre altri saranno penalizzati, in dipendenza da diversi fenomeni fisici.

1.3.1 Onda di superficie.

L'energia emessa in direzione orizzontale da una sorgente trasmittente costituisce l'onda di superficie.

La propagazione in tal modo avviene mediante camminamento dell'onda e.m. lungo la superficie terrestre. In questo modo però essa risentirà degli ostacoli e delle asperità del suolo.

A parità di conformazione della superficie, l'onda risentirà tanto meno dell'effetto di ostacoli ed asperità quanto più grande è la sua lunghezza d'onda, in quanto fenomeni di diffrazione avvengono quando la dimensione degli ostacoli è comparabile con essa; di conseguenza si ha che l'assorbimento del suolo è tanto maggiore quanto più alta è la frequenza impiegata.

Per tale motivo le onde e.m. con cui si ottengono maggiori portate per onda di superficie sono quelle a bassa frequenza.

Le portate ottenibili variano da 1500 – 2000 Km per la banda VLF alle centinaia di Km per la banda HF.

Per le onde VHF e superiori, le portate ottenibili da un'onda di superficie sono trascurabili.

Oltre che dalla frequenza la propagazione superficiale dipende dal tipo di suolo su cui avviene la propagazione. Difatti se il suolo fosse perfettamente conduttore, il campo elettrico al suo interno dovrebbe essere sempre nullo e quindi le linee di forza elettriche dovrebbero essere sempre ortogonali alla superficie.

In realtà a causa della non perfetta conducibilità del suolo il campo elettrico penetra in qualche modo e le linee di forza non sono perfettamente verticali ma leggermente inclinate nel senso di propagazione.

Tale inclinazione comporta l'esistenza di una componente orizzontale del campo elettrico nel suolo, che provoca in esso movimenti di cariche elettriche, con conseguente dissipazione di energia sotto forma di calore, e quindi attenuazione dell'onda e.m.

La superficie di propagazione pertanto si comporta similmente ad una resistenza inserita in un circuito elettrico chiuso.

La penetrazione delle onde e.m. sotto la superficie è tanto maggiore quanto più bassa è la frequenza; grazie a tale comportamento utilizzando le frequenze VLF e ELF è possibile trasmettere informazioni con i sommergibili immersi (limitatamente ad alcune decine di metri).

I vari tipi di superficie vengono classificati in base alla loro conducibilità (che si misura in *siemens* al metro) in cattivi, buoni ed ottimi conduttori.

È evidente pertanto che, a parità di potenza e frequenza, si otterranno portate tanto più elevate quanto maggiore è la conducibilità della superficie. La superficie marina ha una conducibilità relativamente alta nella banda HF.

1.3.2 Onda celeste o ionosferica.

Le onde che si propagano verso il cielo, quando raggiungono i vari strati della ionosfera, sono soggette al fenomeno della rifrazione.

Se l'entità della rifrazione è tale da raggiungere le condizioni di riflessione, le onde celesti, che in questo caso prendono anche il nome di onde ionosferiche, possono tornare sulla superficie terrestre, così come è rappresentato nella figura 1.5.

Le condizioni per cui può avere luogo la riflessione ionosferica si verificano nelle bande MF ed HF. Data la complessità del fenomeno, prima di addentrarci nel problema vero e proprio della propagazione per onda ionosferica, occorre definire la ionosfera.

1.3.3 La Ionosfera.

L'atmosfera è continuamente bombardata da radiazioni ultraviolette (UV) a diverse frequenze, che vi penetrano più o meno profondamente. Quando la radiazione UV, altamente energetica, proveniente dal sole raggiunge gli strati alti dell'atmosfera, interagisce con gli atomi lì presenti. Questo fa sì che uno o più elettroni acquistino abbastanza energia da staccarsi dall'atomo a cui appartengono, creando ioni (carichi positivamente) e elettroni (carichi negativamente).

Dunque a quote fra i 50 e i 450 Km, i gas che costituiscono l'atmosfera si trovano nello stato di *plasma*.

La ionosfera, quindi, come suggerisce il nome stesso, è quella parte dell'atmosfera terrestre caratterizzata dalla presenza di elettroni e di ioni liberi. Tale zona si comporta pertanto come un corpo parzialmente conduttore e la propagazione delle onde e.m. in essa si differenzia notevolmente da quella che avviene nel vuoto o nell'aria.

Nella ionosfera sono state individuate quattro fasce che presentano diverse concentrazioni ioniche comunemente chiamate "strati" e localizzati a diverse quote:

1. *strato D* (circa a 50 – 85 Km dal suolo);
2. *strato E* (circa a 120 Km);
3. *strato F1* (circa a 250 Km);
4. *strato F2* (variabile tra 300 e 450 Km).

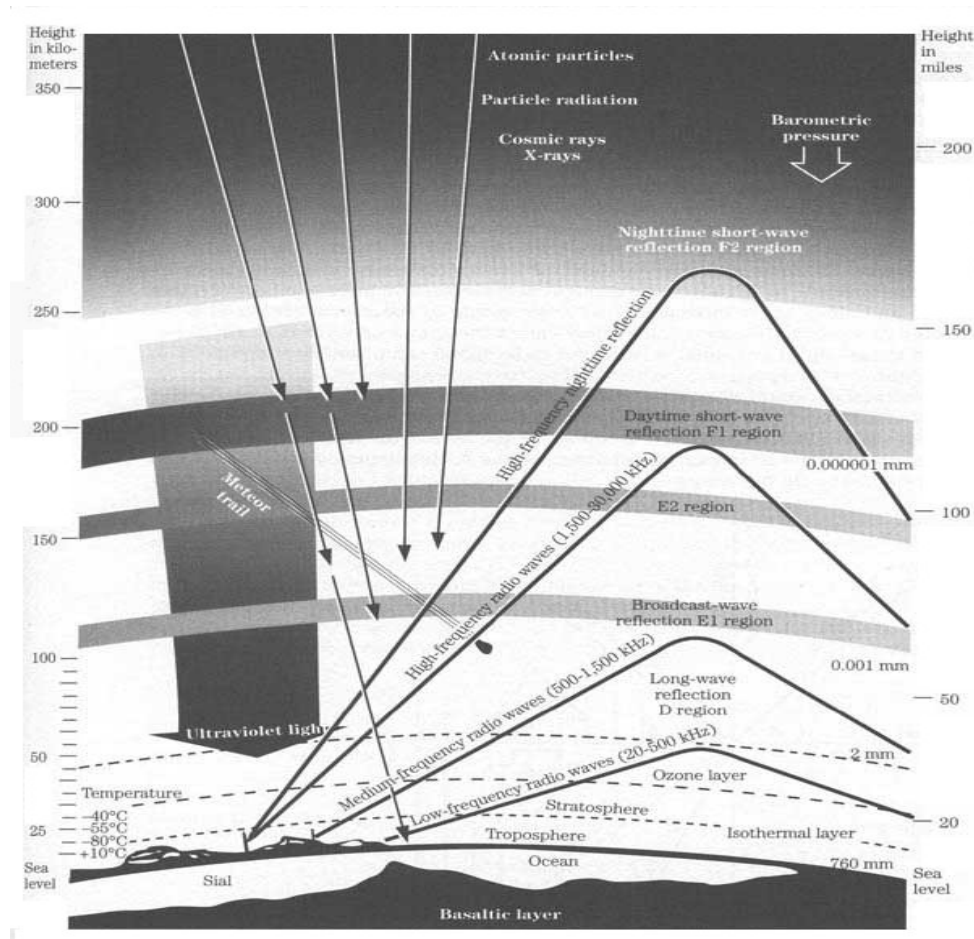


Figura 1.5. Ionosfera.

La densità di ionizzazione dei suddetti strati e la loro quota non è fissa ma varia sia in dipendenza di alcuni fattori noti o prevedibili (figg. 1.5, 1.6) quali:

1. l'ora del giorno;
2. la stagione;
3. l'attività delle macchie solari;
4. la latitudine geografica;

sia in dipendenza di alcuni fattori occasionali quali ad esempio (fig. 1.5):

1. passaggi di meteoriti;
2. irraggiamento corpuscolare dovuto ad attività solari particolarmente intense come le eruzioni cromosferiche (*Flares*).

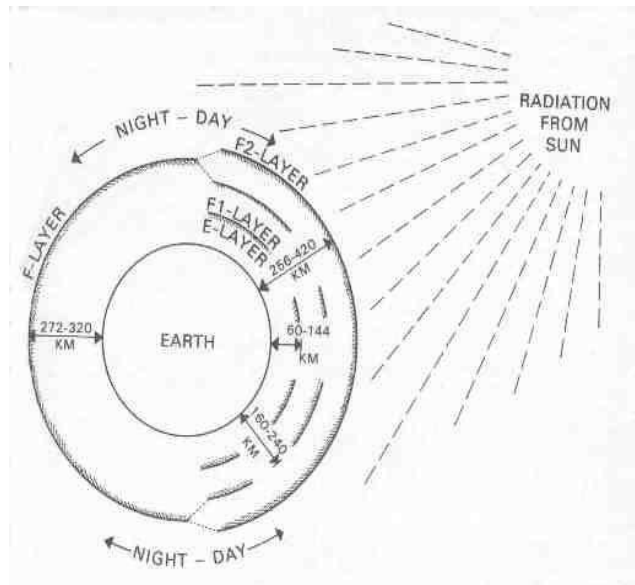
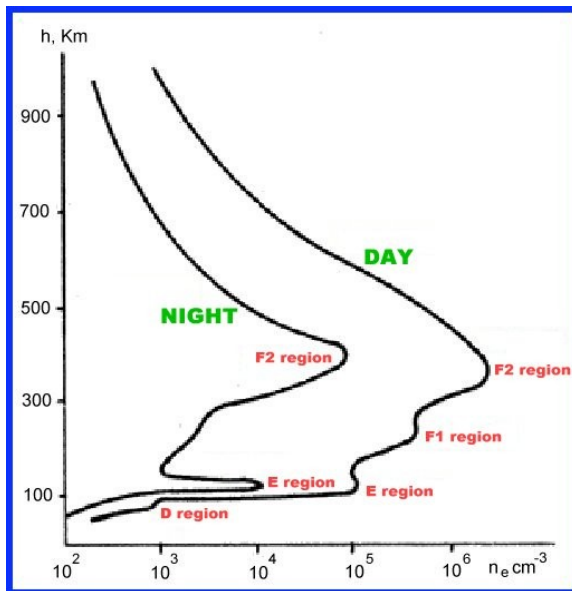


Figura 1.6. Variazioni della densità di ioni nel passaggio dal giorno alla notte.

Esaminiamo ora brevemente le caratteristiche più salienti dei vari strati:

Strato D

Si estende per un'altezza compresa tra 50 e 85 Km da terra ed è presente solo nelle ore diurne. La densità di ionizzazione aumenta con l'elevazione del sole e scompare rapidamente al tramonto a causa della veloce ricombinazione degli ioni, dovuta alla densità gassosa più alta negli strati più bassi dell'atmosfera. Rispetto agli strati superiori lo strato D presenta la densità di ionizzazione più bassa sia a causa della scarsa energia dei raggi UV, che vi arrivano fortemente attenuati, sia della rapidità di ricombinazione degli ioni.

Per quanto riguarda le frequenze HF, essa le attenua parzialmente, non impedendo però a queste di raggiungere gli strati superiori, ove avviene la rifrazione con possibilità quindi di formazione dell'onda ionosferica e propagazione a grandi distanze.

Strato E

Si estende tra 90 e 150 Km di quota e presenta un massimo di densità a circa 110 Km.

La sua densità di ionizzazione segue l'angolo zenitale del sole, raggiungendo il massimo a mezzogiorno, e scende ad un livello talmente basso la notte che talvolta può anche scomparire.

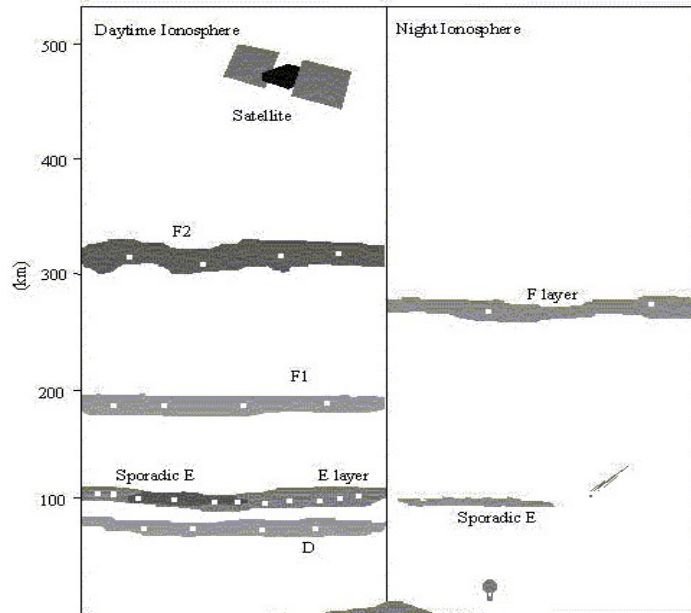


Figura 1.7. Variazioni della concentrazione di ioni nel passaggio dal giorno alla notte.

Occasionalmente sul bordo inferiore si può presentare un sub-strato, detto E sporadico “Es” (fig. 1.7), non prevedibile, irregolare, dovuto a meteoriti o perturbazioni atmosferiche, e che causa fenomeni di assorbimento delle onde e.m. Lo strato E, per quanto riguarda le onde HF, le riflette fino a 20 Mhz, di giorno, in quanto la densità di ionizzazione è più elevata e può quindi dar luogo al fenomeno della rifrazione. Con questa onda ionosferica si possono comunque raggiungere distanze non elevate dato che lo strato E ha quota relativamente bassa.

Strato F1

Si estende da 175 a 250 Km circa di altezza ed è presente solo nelle ore diurne. Durante la notte viene praticamente assorbito nello strato F2. L'andamento della densità di ionizzazione non è ben prevedibile, comunque la sua influenza sulla propagazione e.m. è trascurabile. Infatti le onde che riescono ad attraversare lo strato E proseguono verso lo stato superiore F2, pertanto il suo principale effetto è quello di attenuare debolmente, data la rarefazione dell'atmosfera a quelle quote, le onde che lo attraversano.

Strato F2

Può trovarsi tra i 250 ed i 500 Km di altezza, è lo strato in cui si ha la massima densità di ionizzazione ed è quello che maggiormente influisce sulle comunicazioni ionosferiche nella banda HF.

Inoltre è lo strato in cui avvengono i fenomeni di ionizzazione più complessi ma che fortunatamente sono più noti e prevedibili. La densità di ionizzazione e la quota dello strato variano in funzione dell'ora solare, delle stagioni e del ciclo di undici anni delle macchie solari.

A differenza degli altri strati, la ionizzazione non segue l'andamento dell'angolo zenitale del sole (il massimo si ha dopo mezzogiorno) e la massima ionizzazione si ha d'inverno anziché d'estate, in quanto la densità molecolare dell'atmosfera è maggiore d'inverno.

1.3.4 Effetti della ionosfera sulla propagazione e.m.

Gli effetti prodotti dalla ionosfera sulla propagazione delle onde e.m. sono essenzialmente due:

1. l'attenuazione delle onde e.m.
2. l'incurvamento del percorso delle onde e.m.

1.3.4.1 Attenuazione delle onde e.m.

Nell'attraversare la ionosfera l'onda e.m. dissipa energia e quindi si indebolisce. Tale attenuazione è tanto più elevata quanto più bassa è la frequenza.

La meccanica del fenomeno si può spiegare nel seguente modo: quando un'onda e.m. entra nella ionosfera, sotto l'azione del suo campo elettrico alternativo, gli elettroni liberi formano un campo antagonista alla causa. Finché la velocità di variazione del campo incidente si mantiene al di sotto di un certo limite, le cariche riusciranno a "inseguire" il campo, opponendosi ad esso; altrimenti quando la viscosità del plasma o la frequenza non consentono questo rapido adeguamento, l'onda e.m. attraversa indisturbata il mezzo.

Nel primo caso, ovvero quando il campo incidente oscilla lentamente, gli elettroni assorbono l'energia dell'onda e la reirradieranno tutta e prontamente, senza attenuazioni, se non fossero soggetti ad urti contro le molecole d'aria, che trasformano l'energia da essi posseduta, in calore. L'energia così perduta viene sottratta all'onda la quale risulta attenuata. L'attenuazione pertanto sarà tanto maggiore quanto più elevato sarà il numero degli urti che sarà tanto più elevato quanto:

1. più densa è l'atmosfera (questo spiega perché lo strato D è il maggior responsabile dell'attenuazione);

2. più grande è l'energia posseduta dagli elettroni urtanti, che abbiamo visto essere tanto maggiore quanto più bassa è la frequenza.

Finora abbiamo associato l'attenuazione al movimento degli elettroni, è opportuno però precisare che anche gli ioni positivi risentono dell'azione del campo elettrico, ma dato che la loro massa è molto maggiore di quella degli elettroni, essi subiscono spostamenti così piccoli da causare pochissimi urti molecolari incidendo, quindi, minimamente sulla attenuazione.

1.3.4.2 Incurvamento del percorso delle onde e.m.

L'altro effetto della ionosfera è quello di variare la velocità delle onde rispetto a quella che esse avrebbero nel vuoto o in aria non ionizzata.

La velocità di propagazione, come noto, dipende dalla costante dielettrica ϵ e dalla permeabilità magnetica del mezzo μ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} .$$

Nel caso della ionosfera, la presenza di elettroni liberi fa sì che la costante dielettrica e la permeabilità magnetica del mezzo siano diverse da quelle del vuoto, ϵ_0 e μ_0 , rispettivamente. La costante dielettrica e la permeabilità magnetica del mezzo possono essere espresse come il prodotto delle corrispondenti costanti relative, ϵ_r e μ_r , caratteristiche del mezzo considerato, per la costante dielettrica e la permeabilità magnetica del vuoto, ovvero:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 ,$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 .$$

La velocità di propagazione v diventa:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} ,$$

dove $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$ è la velocità della luce nel vuoto pari a 3×10^8 m/sec

Il rapporto n tra la velocità della luce nel vuoto e quella nel mezzo è definito come l'indice di rifrazione del mezzo:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} .$$

Fisicamente la variazione di velocità di propagazione nel passaggio da un mezzo a un altro, con indice di rifrazione differente, comporta la modifica del percorso dei raggi, fenomeno questo che prende il nome di rifrazione.

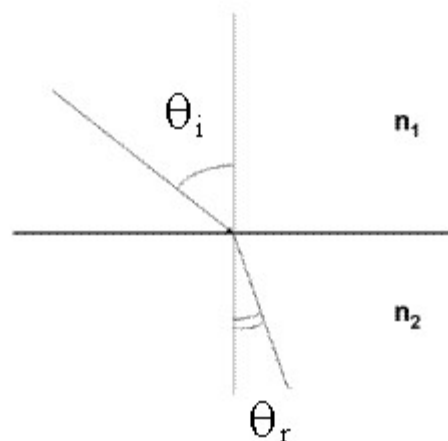
L'indice di rifrazione sarà tanto più piccolo quanto più bassa è la frequenza. Per frequenze superiori a 30 MHz, si può considerare $n=1$. In tal caso l'indice di rifrazione della ionosfera è uguale a quello del vuoto e quindi il percorso delle onde non subisce alterazioni nell'attraversarla.

Le onde di frequenza maggiori di 30 MHz pertanto, si propagano in modo rettilineo anche nella ionosfera, perdendosi così nello spazio.

1.3.5 La riflessione ionosferica.

L'onda e.m. nel passaggio da un mezzo a un altro con differente costante dielettrica e differente permeabilità magnetica, quindi, subisce anche una variazione di velocità.

Questa variazione di velocità comporta una variazione della direzione di propagazione espressa dalla *Legge di Snell* (fig. 1.8):



Legge di Snell

$$\frac{\text{sen}(\theta_i)}{\text{sen}(\theta_r)} = \frac{n_1}{n_2}$$

Figura 1.8. Legge di Snell.

Tale legge inoltre definisce un *angolo limite* θ_{lim} . Ovvero se un raggio incide con un angolo θ_{lim} su una superficie che separa due mezzi eterogenei, il raggio uscente si propagherà lungo la linea di separazione dei due mezzi. Per angoli maggiori di θ_{lim} si ha riflessione totale, per cui, secondo le regole dell'ottica geometrica, il raggio riflesso forma rispetto alla normale alla superficie un angolo uguale a quello del raggio incidente.

In generale, se immaginiamo la ionosfera come fosse costituita da tanti strati omogenei caratterizzati ciascuno da un proprio indice di rifrazione, nel passaggio da uno strato ad un altro la

direzione delle onde si allontanerà sempre di più dalla normale alla superficie di incidenza e quindi sullo strato successivo l'angolo di incidenza θ_i sarà maggiore di quello relativo allo strato precedente

Quando θ_i supera l'angolo limite, l'onda subisce una riflessione e torna verso terra subendo in discesa un processo di rifrazione simmetrico rispetto a quello subito in salita (riavvicinamento alla normale), come mostrato in figura 1.9.

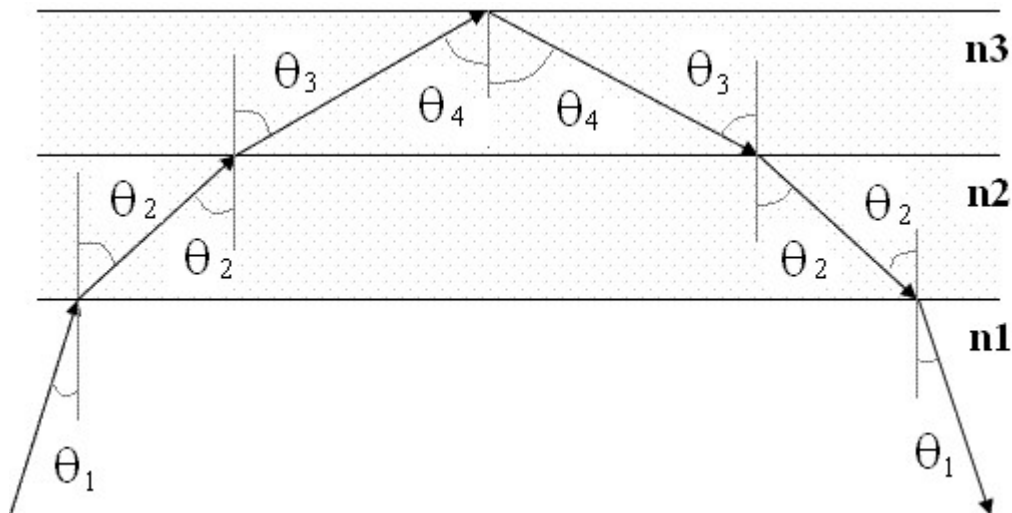


Figura 1.9. Riflessione dell'onda tramite rifrazioni successive.

Appare evidente pertanto che, oltre che dalla frequenza impiegata e dalla ionizzazione degli strati, la possibilità che si verifichi la riflessione delle onde verso terra, dipende dall'angolo iniziale di incidenza θ_i .

A parità di altre condizioni tanto più piccolo sarà θ_i , tanto maggiore sarà la penetrazione degli strati prima che si verifichino le condizioni che permettono la riflessione totale.

Per θ_i molto basso potrebbe verificarsi il caso che le successive rifrazioni non siano sufficienti al raggiungimento della riflessione, per cui le onde, dopo essere state deviate, si perderebbero nello spazio. Viceversa, tanto maggiore sarà θ_i , ossia tanto più vicino sarà all'angolo limite, tanto minore sarà la penetrazione nella ionosfera prima della riflessione totale.

1.3.6 Frequenze utilizzabili per le comunicazioni in onda ionosferica.

Per poter effettuare previsioni di portata di collegamento per onda ionosferica, risulta poco pratico ragionare per ogni frequenza in funzione di tutti i possibili angoli di incidenza. Pertanto per avere una idea di quelle che sono le frequenze che possono essere riflesse, indipendentemente

dall'angolazione di partenza, occorre introdurre un dato caratteristico degli strati della ionosfera: la *frequenza critica* f_0 , definita come quella frequenza al di sotto della quale non può esservi propagazione nel mezzo, oppure analogamente come la massima frequenza per cui si ha riflessione totale quando incide su di un determinato strato con un angolo di incidenza $\theta_i = 0^\circ$ (incidenza verticale), ed è pari a:

$$f_0 = \sqrt{\frac{e^2 \cdot n}{4\pi^2 \cdot m_e \cdot \epsilon_0}} \cong 9\sqrt{n}$$

In cui si è indicato con e la carica di un elettrone, con m_e la massa dell'elettrone e con n la concentrazione elettronica.

Le frequenze superiori a f_0 , nelle stesse condizioni di incidenza verticale non ritornano sulla terra ma, come si suol dire, "bucano" la ionosfera perdendosi nello spazio.

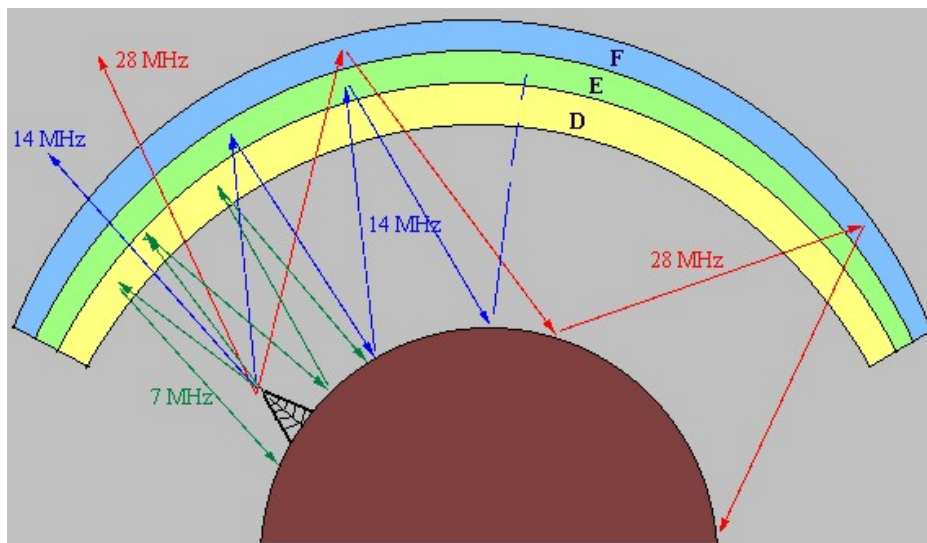


Figura 1.10. Propagazione ionosferica al variare della frequenza e degli angoli di incidenza.

Nota la distanza di collegamento, da cui risulta determinato anche l'angolo di partenza e quello di incidenza sulla ionosfera, occorre determinare la massima frequenza che può essere riflessa al suolo in dipendenza di quel determinato angolo di incidenza.

Tale frequenza si individua con la legge della secante:

$$f_{\max} = \frac{f_0 \cdot k}{\cos(\theta_i)},$$

dove:

- f_{\max} è la massima frequenza utilizzabile con angolo di incidenza θ_i .
- f_0 è la frequenza critica.
- k è un fattore correttivo che tiene conto, tra l'altro, del fatto che gli strati ionosferici sono in effetti curvi e non piani come ipotizzato nella esposizione della *legge di Snell*.

La f_{\max} sopra definita è comunemente nota con il nome di MUF (*Maximum Usable Frequency*).

Pertanto, per un determinato angolo di incidenza frequenze superiori alla MUF perforano la ionosfera.

Da quanto fin qui detto, potrebbe sembrare che, impiegando frequenze inferiori alla MUF, il collegamento ionosferico sia sempre possibile. In effetti esiste un limite inferiore di frequenza utilizzabile, dovuto all'assorbimento della ionosfera che è tanto più elevato quanto più bassa è la frequenza. Tale valore limite prende il nome di LUF (*Lowest Usable Frequency*).

Pertanto le frequenze inferiori alla LUF vengono completamente assorbite dalla ionosfera. Per rendere minimo tale assorbimento converrebbe operare il più vicino possibile alla MUF prevista. Tuttavia si potrebbe correre il rischio che la frequenza impiegata, per occasionali fluttuazioni dell'altezza e della densità degli strati ionosferici, risulti superiore alla MUF relativa a tale particolare situazione e quindi buchi lo strato.

Per ovviare a tale inconveniente si impiega una frequenza inferiore alla MUF del 15 %, detta FOT (*Frequence Optime de Travail*), in italiano *Frequenza Ottimale di Traffico*.

Vari enti internazionali studiano e rilevano strumentalmente la variabilità della ionosfera e pubblicano periodicamente delle previsioni di propagazione che permettono di determinare le frequenze idonee per i collegamenti per onda ionosferica.

1.3.7 Distorsioni del canale sky wave.

I meccanismi fisici che influenzano la propagazione e la ricezione delle onde HF attraverso la ionosfera sono molteplici e si possono riassumere come segue:

- Variazione continua (diurna, stagionale e interannuale) della ionosfera;
- Struttura spazialmente estesa della ionosfera che dà luogo a fenomeni come le anomalie equatoriali;
- Propagazioni simultanee su più canali, che spesso danno luogo a salti Doppler ionosferici;
- Variazioni nel termine di fase, indotte da onde ULF, originate dal plasma ionosferico;
- Disturbi originati dal passaggio dal giorno alla notte;
- Eco transitori dovuti al passaggio di meteore, alle aurore e ad altre fonti ionosferiche;

- Fluttuazioni della polarizzazione dei segnali.

È evidente che questi fenomeni influenzano la propagazione delle onde celesti su scale sia temporali che spaziali estremamente ampie. Per minimizzare l’impatto che questi fenomeni possono avere sulla propagazione delle onde e.m. sono a disposizione del progettista diversi parametri su cui lavorare:

- Posizionamento dei siti di trasmissione e ricezione per ottimizzare le prestazioni sull’area di interesse;
- Potenza e direttività dell’antenna;
- Configurazione bistatica o multistatica del sistema;
- Scelta della forma d’onda più adatta;
- Programmazione intelligente dei compiti del radar;
- Elaborazione del segnale accurata, specialmente per quanto riguarda la adattatività del sistema;
- Fusione dei dati radar con output provenienti da altri sensori.

In aggiunta alle informazioni ottenute dall’analisi dei dati radar, i più moderni sistemi radar HF includono nel loro sistema i *frequency management systems* (FMS), che forniscono una “fotografia” sinottica delle condizioni prevalenti della ionosfera; l’ottimizzazione del sistema, tuttavia, è basata oltre che sui dati forniti dal radar e dai sensori esterni anche su un giudizio umano.

Ovviamente la qualità della stima del canale dipende da quali fenomeni ionosferici si intende contrastare e dalla precisione che si vuole ottenere. Un buon parametro di giudizio per valutare questi effetti è dato dal *signal-to-(interference + noise + clutter) ratio* (SINCR) in una data cella di risoluzione in azimuth:

$$SINCR = \frac{S}{I + N + C}.$$

Dove S rappresenta il segnale desiderato, I rappresenta l’interferenza residua dopo l’eliminazione dei disturbi, N è il rumore residuo dopo il filtraggio spazio-temporale e C è il clutter di terra, di mare e ionosferico [5].

1.4 Note tecniche sui radar HF-OTH esistenti.

Verranno di seguito analizzati brevemente alcuni dei sistemi esistenti, fornendo le caratteristiche salienti di questi dispositivi, per dare una panoramica di come siano state applicate le tecniche teoriche sopra esposte.

I sistemi in discussione sono lo statunitense AN/FPS-118 noto anche come Over-the-Horizon Backscatter (OTH-B) radar, il francese NOSTRADAMUS, e l'australiano JINDALEE OPERATIONAL RADAR NETWORK (JORN).

1.4.1 Il sistema AN/FPS-118.

Il sistema si avvale di sei radar, di cui tre posizionati sulla costa ovest degli Stati Uniti con centro operativo a Mountain Home e tre posizionati nel Maine sulla costa orientale con centro operativo a Bangor.

Ogni installazione OTH è formata da un centro operativo di controllo e da un numero variabile di sottosistemi di trasmissione e ricezione. Come si può vedere dalla figura 1.11, ciascuna unità fornisce una copertura su un settore angolare di 60°.

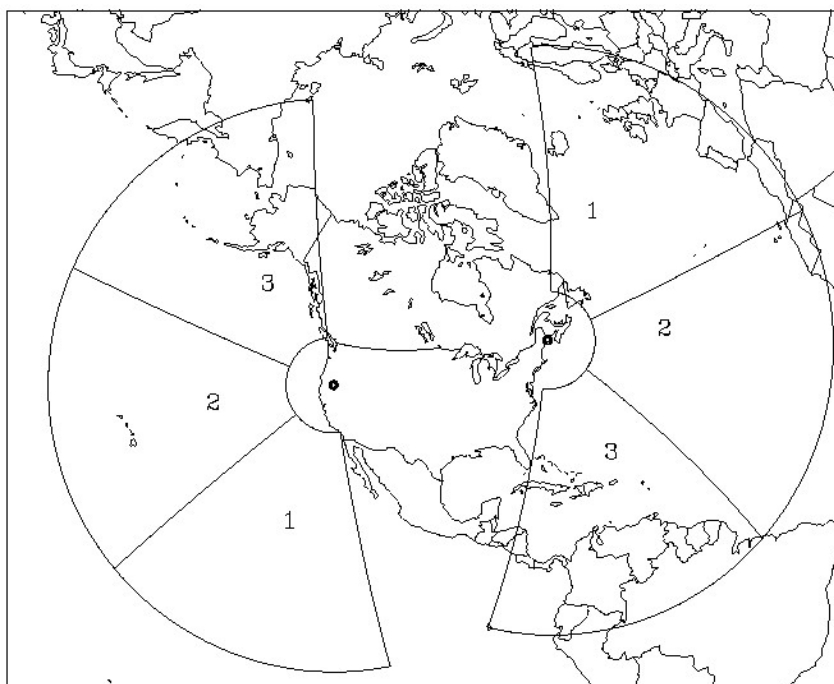


Figura 1.11. Aree di copertura del radar AN/FPS-118.

Il centro operativo di controllo di ogni installazione accoglie le console di presentazione dati per gli operatori radar e il centro di elaborazione dati, che può contare su 16 computer Digital Equipment VAX 8600. Altri due VAX sono presenti presso ciascun sottosistema di trasmissione e ricezione.

Il sottosistema di trasmissione è costituito da un'antenna (fig. 1.12) che può estendersi fino a 1190 m, ed in altezza dagli 11 ai 45 m, mentre un edificio accoglie dodici trasmettitori da 100 kW e i computer.

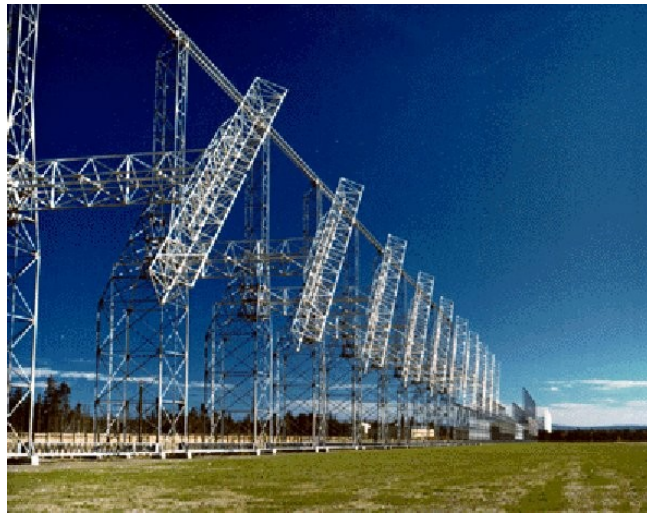


Figura 1.12. Antenna trasmittente del radar AN/FPS-118.

L'antenna ricevente è costituita da 246 elementi e si estende su 1515 m, con elementi radianti alti 20 m. Un edificio dedicato ospita i sistemi di elaborazione del segnale. Trasmettitori e ricevitori sono separati da circa 200 km.

Questo sistema presenta interessanti capacità. Bersagli sensibili, come possono essere i missili da crociera, possono essere avvistati a centinaia di chilometri di distanza, i bersagli aerei possono essere tracciati anche a 3000 chilometri di distanza, in determinate condizioni atmosferiche.

Il radar in trasmissione impiega frequenze che vanno dai 5 ai 28 MHz in 6 bande, presenta un'apertura azimutale del fascio in trasmissione di $7,5^\circ$ e un'elevazione del fascio in trasmissione di $8,33^\circ$ a 5 MHz e di $5-15^\circ$ a 28 MHz.

In ricezione utilizza frequenze da 5 a 28 MHz suddivise in 3 bande, presenta un'apertura azimutale del fascio che varia tra $1,25^\circ$ e $2,5^\circ$, un'elevazione del fascio in ricezione uguale a quella in trasmissione.

1.4.2 Il sistema NOSTRADAMUS.

Il sistema attualmente in uso è situato nella regione di Dreux ad ovest di Parigi e presenta una distribuzione delle antenne alquanto originale. Si tratta infatti di un'area a forma di stella a tre bracci, spaziate tra di loro di 120° (fig. 1.13). Ogni braccio è lungo 400 m e largo 80 m e contiene circa 100 antenne (sono 288 antenne in tutto) che hanno sia funzioni trasmettenti che riceventi. Il sistema, infatti, è di tipo monostatico. La soluzione che si presenta è fortemente originale non solo per il fatto che il sistema è monostatico, ma anche perché la distribuzione delle antenne è stata effettuata in maniera aleatoria, ponendo il vincolo di appartenenza alla stella e il rispetto di una distanza minima tra gli elementi allo scopo di minimizzare gli effetti di accoppiamento fra gli

elementi radianti. Questi ultimi rappresentati in figura 1.13, sono delle antenne biconiche di 6 metri di raggio e 7 metri di altezza. Ogni elemento è dotato di un sistema di gestione della ampiezza e della fase, l'insieme di questi dispositivi costituisce il sistema di orientamento del fascio e viene gestito centralmente da un laboratorio dedicato.



Figura 1.13. Disposizione del parco antenne e dettaglio delle antenne del sistema NOSTRADAMUS.

Le antenne in trasmissione sono un sottoinsieme di quelle totali. Si tratta infatti di circa un centinaio di antenne, ognuna delle quali è alimentata da trasmettitori di qualche kW.

In ricezione le antenne sono tutte attive e il segnale ricevuto viene convertito in banda base, campionato a frequenza opportuna e convertito su 16 bit. In seguito viene elaborato da un elaboratore centrale con una potenza di calcolo dell'ordine dei Gigaflops.

Il fascio in trasmissione è molto più ampio di quello in ricezione, ma questo è in linea con le metodologie di scansione degli altri radar HF sky wave: una zona molto ampia, detta di sorveglianza, viene illuminata mentre la ricerca di bersagli viene fatta su uno spot di dimensioni ridotte [6].

1.4.3 Il sistema JORN.

Il progetto prevede un sistema di sorveglianza HF costituito da una rete di tre radar OTH, come evidenziato in figura 1.14, uno dei quali gestisce una copertura di 180°, mentre gli altri due di 90°.

La differenza sostanziale con il concetto originario di radar OTH, consiste in questa operazione di integrazione fra sensori: alle tre unità sono delegate solo le funzioni primarie di ricezione, trasmissione e sincronizzazione. L'elaborazione del dato grezzo viene fatta in una località remota (Adelaide, nel sud dell'Australia) da cui è possibile quindi avere una visione globale dello scenario.

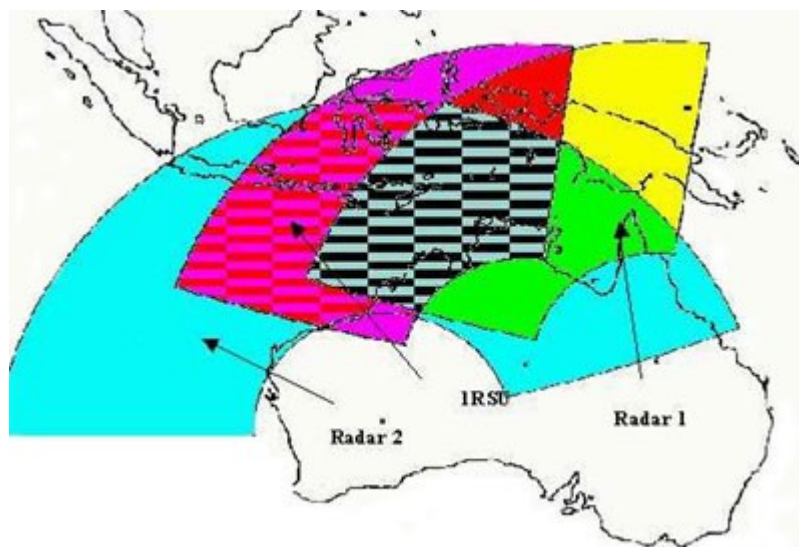


Figura 1.14. Zone di copertura dei radar.

La rete di sondaggio della ionosfera è altrettanto interessante: ogni stazione OTH è dotata della propria ionosonda obliqua che analizza il segnale riflesso per fornire una stima delle caratteristiche del segnale. Questi dati sono successivamente integrati da una serie di dati provenienti da tutta un'altra serie di sensori: QVI, ionosonde oblique one-way e segnali provenienti da trasponder noti. Le informazioni provenienti dalla suddetta rete di sonde, vengono integrate da informazioni circa l'occupazione di banda e la potenza di rumore esterno provenienti da un analizzatore di spettro. Il sito trasmittente è costituito da 28 amplificatori allo stato solido, ognuno dei quali eroga una potenza di 20 kW, accoppiati ad altrettante antenne (fig. 1.15).



Figura 1.15. Antenne trasmittenti del radar Jindalee.

La schiera di antenne è di tipo lineare con elementi uniformemente distribuiti lungo i 200 m di lunghezza.

La schiera di antenne riceventi, riportata in figura 1.16, è distribuita su un'area di 3 Km per 300 m ed è costituita da 240 coppie di elementi, che forniscono il segnale ad uno stadio supereterodina a doppia conversione.



Figura 1.16. Antenne riceventi per il sistema radar Jindalee.

Il segnale in banda base viene poi inviato allo stadio di elaborazione costituito da calcolatori con potenza di calcolo dell'ordine dei 50 Gigaflops. Dopo una prima elaborazione i dati vengono inviati al centro di coordinamento remoto, dove subiscono ulteriori elaborazioni [7].