

Navigazione iperbolica

4.1 Introduzione e brevi cenni storici

Con i sistemi radiogoniometrici è stato possibile ottenere un luogo di posizione rilevando con particolari antenne la direzione di provenienza delle onde elettromagnetiche. Non è tuttavia possibile impiegare queste tecniche a grandi distanze in quanto le misure effettuate non sono precise e, di conseguenza, la posizione ottenuta presenta incertezze non compatibili con le precisioni che si richiedono in navigazione.

Tra i parametri di un'onda elettromagnetica quello che presenta maggiore stabilità è la velocità di propagazione c ; nel vuoto essa è uguale a $299\,792.5 \pm 0.3$ km/s (in pratica è considerata uguale a 300000 km/s).

È possibile, pertanto, determinare la distanza tra una stazione trasmittente e un ricevitore mediante due diverse tecniche: con misure di tempo o di fase.

Con la prima tecnica si misura l'intervallo di tempo trascorso tra gli istanti di emissione (t_e) e di ricezione (t_r) di un impulso radioelettrico; la distanza d è uguale a:

$$d = c (t_r - t_e) \quad (4.1)$$

Per rendere possibile la misura è necessario che l'emissione degli impulsi sia cadenzata mediante una scala dei tempi di altissima precisione in modo che sia noto l'istante di trasmissione di ciascun impulso; inoltre, sia la stazione trasmittente, sia il ricevitore, devono essere dotati di orologi sincronizzati su una comune scala dei tempi (scala UT).

Attualmente vengono utilizzati orologi in grado di sfruttare la frequenza naturale di oscillazione di atomi o di molecole eccitate (orologi atomici al cesio): la precisione di questi orologi è dell'ordine di $\pm 10^{-13}$ (1 secondo in 300000 anni!).

Con la seconda tecnica viene misurata la differenza tra le fasi che un'onda continua ha nell'istante di emissione ($\varphi_e = 2\pi f t_e$) e in quello di ricezione ($\varphi_r = 2\pi f t_r$) uguale a:

$$\varphi_r - \varphi_e = 2\pi f (t_r - t_e)$$

che, tenendo presente la (4.1), diventa:

$$d = \frac{c}{2\pi f} (\varphi_r - \varphi_e) \quad (4.2)$$

Anche in questo caso occorre che la fase di emissione dell'onda continua sia sincronizzata con una scala dei tempi di altissima precisione e che stazione emittente e ricevitore siano dotati di orologi sincronizzati con detta scala.

Il luogo di posizione ottenuto, in entrambi i casi, è una circonferenza avente come centro la stazione trasmittente e come raggio la distanza misurata (fig. 4.1).

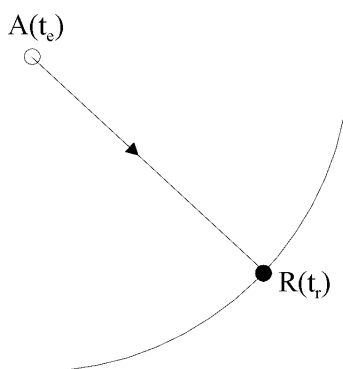


Figura 4.1 – Misura di distanza noti gli istanti di partenza (t_e) e di arrivo (t_r) del segnale radioelettrico

La misura della distanza richiede, come si è visto, che il ricevitore di bordo sia dotato di un orologio atomico: l'elevato costo di esso rende proibitiva la diffusione di un tale apparato.

L'orologio atomico è così chiamato non perché viene alimentato da energia atomica ma perché sfrutta certe proprietà fondamentali dell'atomo per fornire una definizione di tempo.

Ciascun atomo, infatti, possiede diversi *livelli di energia*: alla transizione da uno di questi livelli a quello immediatamente inferiore corrisponde l'emissione di una radiazione di determinata frequenza.

Gli atomi del cesio 133 sottoposti all'azione di un campo magnetico possono collocarsi su due livelli di energia che corrispondono a due diversi momenti angolari dell'atomo: ognuno di questi livelli possiede poi una struttura *iperfine* (sottolivelli) e la transizione tra due di essi avviene con l'emissione di una radiazione di frequenza stabile uguale a 9 192 631 770 oscillazioni al secondo (Hz).

Da qui deriva la definizione di *secondo*, introdotta nel 1967 dall'*International Bureau of Weights and Measures*, come la durata di 9 192 631 770 cicli della radiazione del cesio 133.

La selezione dei due sottolivelli di energia per i quali avviene la transizione si ottiene riscaldando a 80 °C una massa di cesio i cui vapori, allo stato atomico, vengono spinti attraverso le polarità di un magnete in modo che soltanto le traiettorie corrispondenti al prestabilito livello di

energia proseguono in linea retta. Il fascio attraversa una cavità nella quale c'è vuoto spinto e un debole campo magnetico uniforme; gli atomi vengono eccitati da una sorgente di microonde portata alla stessa frequenza della radiazione del cesio eccitando la transizione atomica.

Focalizzati da un secondo magnete, il fascio di atomi, uscendo dalla cavità, colpisce un elettrodo al platino-iridio generando una corrente elettrica di uguale frequenza.

La frequenza 9 192 631 770 delle microonde è generata da un cristallo a quarzo (a 5 MHz) attraverso moltiplicatori di frequenza e sintetizzatori; tale frequenza è resa stabile, attraverso un meccanismo di *feedback*, dalla frequenza atomica del cesio in maniera analoga a quanto avviene in un oscillatore controllato in tensione.

Il ricevitore di bordo può fare a meno dell'orologio atomico se non ha la necessità di essere sincronizzato con la scala dei tempi che regola l'emissione dei segnali radioelettrici provenienti dalla stazione trasmittente. Ciò si verifica quando due stazioni trasmittenti lavorano in coppia anziché isolatamente.

In questo caso le stazioni *A* e *B*, tra loro sincronizzate su una scala comune dei tempi, emettono simultaneamente impulsi a una determinata cadenza. Il ricevitore di bordo misura l'intervallo di tempo Δt tra l'arrivo dei due impulsi determinando, di conseguenza, la differenza di distanza tra l'aeromobile e le due stazioni (fig. 4.2):

$$\Delta d = d_A - d_B = c(t_A - t_e) - c(t_B - t_e)$$

essendo d_A e d_B le distanze tra l'aeromobile e le stazioni *A* e *B*, t_e l'istante comune di emissione dei due segnali, t_A e t_B gli istanti di ricezione degli stessi.

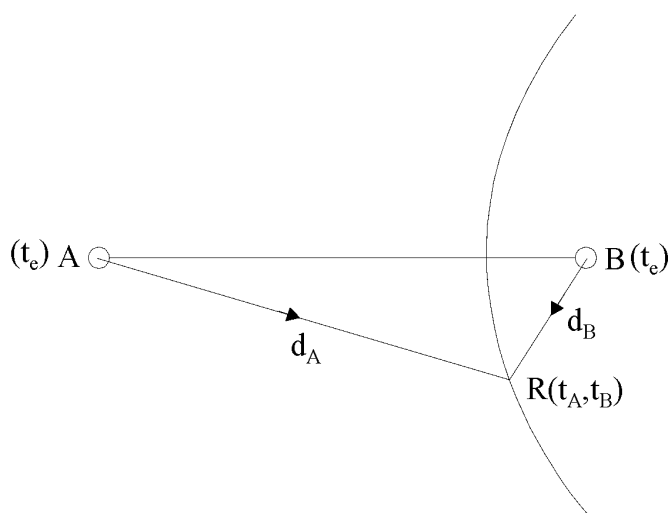


Figura 4.2 – Misura di differenza di distanze noti gli istanti di arrivo (t_A e t_B) dei segnali radioelettrici

Si ha, pertanto:

$$\Delta d = c(t_A - t_B) \quad (4.3)$$

che non dipende dall'istante di emissione.

Analogamente, se le due stazioni emettono onde continue, di pari frequenza, tra loro sincronizzate in fase, è possibile misurare la differenza di fase $\Delta\varphi$ tra le due radioonde e ricavare la differenza di distanza Δd :

$$\Delta d = \frac{c}{2\pi f} (\varphi_A - \varphi_B) = \frac{c}{2\pi f} \Delta\varphi \quad (4.4)$$

essendo φ_A e φ_B le fasi delle due radioonde nell'istante in cui esse pervengono al ricevitore.

Il luogo di posizione ottenuto, in entrambi i casi, è un'iperbole definita come il luogo geometrico dei punti per i quali è costante la differenza di distanza da due punti fissi (*fuochi*). Nel caso esaminato i fuochi sono rappresentati dalla posizione occupata dalle due stazioni mentre l'iperbole, a seconda della forma assegnata alla Terra, è una curva sferica o ellissoidica.

Si definisce, pertanto, *navigazione iperbolica* l'insieme delle tecniche che consentono la determinazione della posizione dell'aeromobile con luoghi di posizione iperbolici (fig. 4.3).

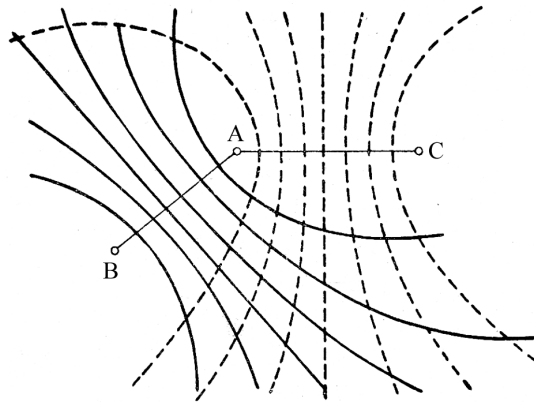


Figura 4.3 – Ogni coppia di stazioni determina una famiglia di iperboli omofocali

La determinazione della posizione mediante luoghi iperbolici risale alla prima guerra mondiale. In quel tempo i francesi e gli inglesi escogitarono sistemi per localizzare la posizione dei cannoni tedeschi misurando, con idonei microfoni installati agli estremi di basi di posizione e lunghezza note, la differenza tra gli istanti di arrivo del suono provocato dagli spari.

Anche i tedeschi usarono tale metodo e, costruendo reticolati iperbolici, anticiparono quelli che anche oggi vengono comunemente usati in radionavigazione.

Negli anni tra la prima e la seconda guerra mondiale, ricercatori di vari paesi (Stati Uniti, Germania, Francia, Russia) proposero metodi radioelettrici per ottenere differenze di distanze onde procedere alla determinazione della posizione con luoghi iperbolici. Fra questi il primo a imporsi fu il sistema *Decca* basato sulla tecnica del confronto delle fasi.

Il principio del *Decca* fu studiato nel 1937 negli Stati Uniti da W.J. O'Brien che iniziò i primi esperimenti in California. La sperimentazione passò poi in Inghilterra sotto l'egida dell'*Admiralty Signals Establishment and Decca*, raggiungendo risultati positivi tanto che durante l'ultimo conflitto il sistema fu usato per guidare i dragamine e i mezzi da sbarco durante l'invasione alleata in Normandia (1944).

Nell'anno successivo venne costituita la società *Decca Navigator Co Ltd* e nel 1946 fu impiantata la prima catena *Decca* lungo la costa orientale dell'Inghilterra. Il sistema *Decca*, utilizzando radioonde comprese nella gamma delle *LF (Low Frequency)* e potenza di trasmissione non troppo elevata, è un sistema a medio raggio.

Nel 1947 J.A. Pierce, per ottenere portate più elevate accompagnate da un'alta stabilità di propagazione, propose un sistema a confronto di fase operante con onde continue comprese nella gamma *VLF (Very Low Frequency)*.

Fu sperimentato così nel Pacifico il sistema *Radux* con due stazioni distanti tra loro 2000 NM, trasmettendo con continuità radioonde con frequenza di 40 kHz.

Risultati lusinghieri furono però ottenuti con frequenze ancora più basse; per cui Pierce si orientò nella banda intorno ai 10 kHz.

Nel 1955 si passò al sistema *Radux-Omega* e infine al sistema *Omega*, operante con frequenze comprese tra 10 e 14 kHz.

Le tecniche relative alle misure di differenze di tempo risalgono al 1941, anno in cui gli inglesi misero in funzione un primo sistema di radionavigazione iperbolica chiamato *Gee* che operava a frequenze comprese fra i 30 e gli 80 MHz; tale sistema consentiva misure di differenze di tempo fra segnali a impulsi provenienti da coppie di stazioni entro portate di 350-400 NM per aerei ad alte quote mentre per navi o aerei a basse quote la portata era di molto ridotta.

Gli americani potenziarono tali ricerche concentrando la loro attenzione sulla propagazione delle radioonde a più bassa frequenza e studiando, in particolare, il comportamento delle onde la cui banda era compresa fra 2.9 e 8.5 MHz.

Nell'estate del 1941 furono installate due stazioni (a Montauk Point e a Fenwick Island) distanti tra loro 209 NM che trasmettevano impulsi con una cadenza pari a 33.3 impulsi al secondo e una potenza di picco di 5 kW.

Fu trovato che i segnali provenienti dalla riflessione dello strato ionosferico *E* (segnali *SW = Sky Wave*) erano forti e abbastanza stabili.

Successivamente (primavera del 1942) furono fatte esperienze con frequenze di 1.95 MHz col risultato che le onde superficiali ($GW = \text{Ground Wave}$) potevano essere usate per la sincronizzazione diretta di due stazioni consentendo portate fino a 600-700 NM sul mare mentre con le SW si potevano raggiungere portate fino a 1300-1400 NM durante le ore notturne.

Nel giugno 1942 fu resa operante una prima catena *Loran* (il termine *Loran* deriva dall'acronimo *L*ong *R*ange *N*avigation) aggiungendo alle precedenti una terza stazione a Long Island. Detta catena funzionava a 100 kW, 25 impulsi al secondo e con frequenze di 1.95 e 7.5 MHz; la prima frequenza fu quella che diede i migliori risultati.

Più tardi (in ottobre) furono installate altre stazioni in territorio canadese e il servizio aveva una durata di 16 ore al giorno; ma soltanto dalla primavera dell'anno successivo, quando furono costruite le carte per tutte le coppie di stazioni esistenti e furono imbarcati una cinquantina di ricevitori su altrettante navi americane e canadesi, il sistema *Loran A* (allora detto *Standard Loran*) divenne completamente operativo.

Alla stessa epoca (10 aprile 1943) fu fatta un'importante esperienza: la stazione di Fenwick riuscì a mantenere il sincronismo, durante le ore notturne, con i segnali SW provenienti da una stazione distante ben 1100 NM e situata a Bonavista (Newfoundland); la precisione trovata fu dell'ordine di 0.5 NM.

Nacque così l'*SS-Loran* (*Sky-wave Synchronised Loran*) con il quale, a partire dalla primavera del 1944, per motivi bellici, fu coperta l'intera area europea con solo 4 stazioni poste a Port Errol (Scozia), Biserta (Tunisia), Orano (Algeria) e Apollonia (Libia). Il sistema fu usato a partire dall'ottobre del 1944 e diede risultati accettabili, sebbene non fossero state raccolte molte notizie sulla fluttuazione dello strato E in tali regioni.

Subito dopo la guerra ebbero inizio esperimenti sulla frequenza di 180 kHz allo scopo di aumentare la portata; furono infatti raggiunte portate di 2000/2500 NM ma, poiché venivano ricevuti contemporaneamente segnali GW misti a segnali SW , la precisione non era molto buona.

Si sviluppò, allora, il sistema *Cyclan* a due frequenze (180 e 200 kHz) in grado di conseguire una migliore precisione nella determinazione dell'intervallo di tempo con la misura delle fasi del segnale costituente gli impulsi *Loran*; detto sistema entrò in funzione nel 1951.

Questa nuova tecnica fu meglio sfruttata con frequenze di 100 kHz e con impulsi di forma opportuna in un nuovo sistema detto *Cytac* che dal 1957 assunse il nome di *Loran C*.

Diverse catene *Loran C* furono installate a partire dal 1957 sulla costa orientale degli Stati Uniti e nel 1959 entrò in funzione una catena *Loran C* anche nel Mediterraneo (attualmente questa catena funziona solamente in parte).

Tra i sistemi iperbolici a confronto di fase il solo attualmente operante è il

Decca; esso è presente lungo le coste nord-occidentali dell'Europa e viene usato prevalentemente in navigazione marittima.

Il sistema *Omega*, anch'esso a confronto di fase, è stato in funzione fino al settembre 1997; con tale sistema veniva assicurata la copertura globale con appena otto stazioni.

L'unico sistema iperbolico invece a impulsi, tuttora operante, per la navigazione aerea è il *Loran C*: esso ha una copertura sull'intera area continentale degli Stati Uniti, in nord Atlantico, nel mare di Norvegia, in Canada e in altre zone della Terra.

Un analogo sistema, messo a punto dai russi, il *Chayka* (gabbiano), ha una copertura che si estende su due grandi aree: la prima tra i paralleli 40° e 65° N e tra i meridiani 5° e 50° E; la seconda tra i paralleli 35° e 65° N e i meridiani 135° e 160° E.

La *FAA* (*Federal Aviation Administration*), l'ente federale americano per l'aviazione civile, ha riconosciuto il sistema *Loran C* come sistema supplementare per lo spazio aereo statunitense (*NAS = National Airspace System*) sia per la fase di crociera, sia per quella di avvicinamento (a esclusione degli avvicinamenti di precisione).

Allo stato attuale una decina di aeroporti americani hanno procedure di avvicinamento basate sul *Loran C*.

4.2 Principio di funzionamento dei sistemi Loran

Si considerino due stazioni *A* e *B*, poste in località note e a distanza Δ , che emettono simultaneamente in tutte le direzioni un numero n di impulsi al secondo (*cadenza*), intervallati tra loro di una quantità costante I (*intervallo di cadenza*) espressa in microsecondi ($1 \mu\text{s}$ corrisponde a un milionesimo di secondo).

La cadenza n (nota anche come *PRR = Pulse Recurrence Rate*) è legata all'intervallo di cadenza I attraverso la relazione:

$$n = \frac{1\,000\,000}{I}$$

A un ricevitore arriveranno, sequenzialmente, gli impulsi delle due stazioni: prima quelli della stazione più vicina e poi quelli dell'altra.

Con una particolare tecnica si può misurare la differenza di tempo Δt tra l'arrivo dei segnali che è funzione della differenza di distanza del ricevitore dalle due stazioni; infatti, poiché ogni segnale per giungere al ricevitore impiega un tempo:

$$t = \frac{d}{c}$$

dove d è la distanza tra la stazione e il ricevitore e c la velocità di propagazione delle radioonde, supposta rigorosamente costante, la differenza di tempo Δt sarà data da:

$$\Delta t = \frac{d_A - d_B}{c} \quad \text{oppure} \quad \Delta t = \frac{d_B - d_A}{c}$$

a seconda che sia più vicina la stazione B o quella A (fig. 4.4).

La misura di Δt determina un luogo di posizione che è un'iperbole sferica (se consideriamo la Terra sferica) avente come fuochi le due stazioni trasmettenti.

La stessa misura Δt si effettuerebbe, quindi, su entrambi i rami di iperbole dando luogo a un'ambiguità in quanto il ricevitore non è in grado di stabilire quale dei due impulsi arriva per primo; inoltre, nei pressi della linea di centro (asse non trasverso) la differenza Δt è tanto piccola che gli impulsi si sovrapporrebbero rendendo difficile la sua misura.

Per eliminare la suddetta ambiguità si rende l'emissione degli impulsi da parte delle due stazioni non simultanea ma intervallata di una quantità costante ED (*Emission Delay*): la stazione A trasmette impulsi in tutte le direzioni che arrivano alla stazione B dopo un intervallo di tempo $T = \Delta / c$ e da questa vengono ritrasmessi dopo un intervallo δ (detto *Coding Delay*). Per tale ragione la stazione A è detta stazione principale (M o *Master*) e la B stazione asservita (S o *Slave*).

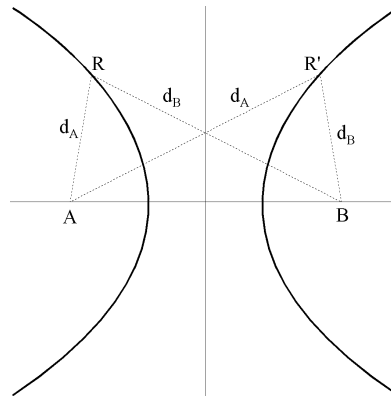


Figura 4.4 – Ambiguità nella determinazione del luogo di posizione

La cadenza impulsiva delle due stazioni resta la stessa ma ora il ricevitore ha la possibilità di indicare quale tra i due impulsi è quello della stazione principale M in quanto al ricevitore esso arriverà dopo un intervallo di tempo:

$$t_M = \frac{d_M}{c}$$

mentre quello della stazione asservita S impiegherà un tempo sempre maggiore dato da:

$$T + \delta + \frac{d_S}{c} = T + \delta + t_S$$

per cui la differenza di tempo risulta:

$$\Delta t = (T + \delta + t_S) - t_M \tag{4.5}$$

Il valore Δt , noto anche come TD (*Time Difference*), di una misura *Loran* è sempre positivo per cui rimane definito un solo ramo d'iperbole; Δt varia tra un minimo e un massimo, valori che si hanno sui prolungamenti della linea di base (fig. 4.5).

Infatti, sul prolungamento della linea di base dalla parte della stazione asservita, essendo $t_M = T + t_S$ la (4.5) diventa:

$$\Delta t = \delta$$

da cui si evidenzia l'utilità del *Coding Delay* che consiste nell'evitare differenze di tempo prossime a zero (il realtà il *coding delay* è stato introdotto anche per motivi di sicurezza: in tempo di guerra, infatti, esso poteva essere modificato rendendo impossibile l'utilizzo del sistema da parte di forze nemiche).

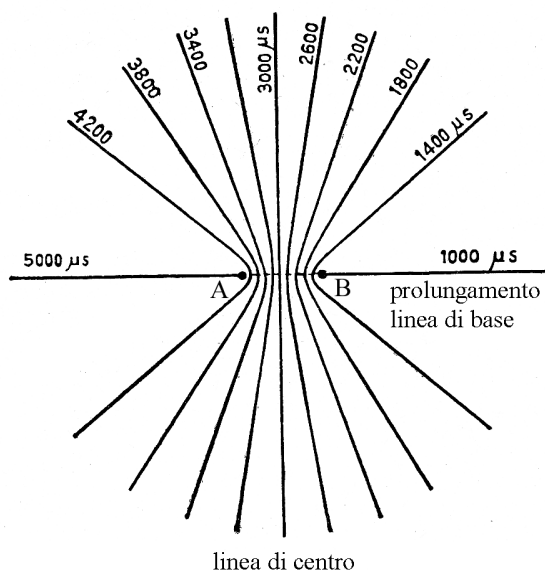


Figura 4.5 – Variazione della misura Δt intorno a una coppia di stazioni nell'ipotesi in cui $\delta = 1000 \mu s$ e $T = 2000 \mu s$ (A è la stazione principale, B quella asservita)

Sulla linea di centro si ha $t_M = t_S$ per cui la (4.5) diventa:

$$\Delta t = T + \delta$$

mentre sul prolungamento della linea di base dalla parte della stazione principale, essendo $t_M = t_S - T$ si ottiene il massimo valore di Δt dato da:

$$\Delta t = 2T + \delta$$

I rami di iperboli hanno tra loro distanza minima sulla linea di base e vanno divergendo tra loro quando ci si allontana da detta linea; la divergenza, inoltre, è tanto più accentuata quanto più le iperboli si avvicinano ai prolungamenti delle linee di base (*iperboli degeneri*). Infatti la distanza e in miglia tra due iperboli è data da:

$$e = \frac{1}{2} k x \operatorname{cosec} \frac{\psi}{2} \quad (4.6)$$

dove x è la differenza di lettura tra le due iperboli espressa in microsecondi, ψ è l'angolo sotto cui vengono sottese le due stazioni e k , uguale a 0.162, una costante che permette di ottenere la distanza e in miglia nautiche (fig. 4.6).

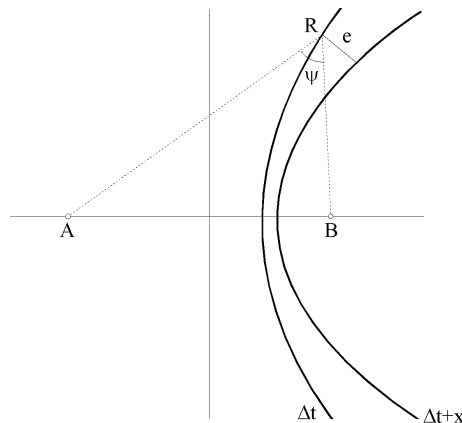


Figura 4.6 – Le iperboli divergono con l'allontanarsi dalla linea di base

Sulla linea di base, essendo $\psi = 180^\circ$, si ha:

$$e = 0,081 x$$

mentre sui prolungamenti della linea di base, poiché $\psi = 0^\circ$, si ha che e diventa infinitamente grande.

Per ottenere, a parità di errore x , incertezze minime, è necessario che l'angolo ψ sia il più grande possibile (la funzione cosecante, infatti, varia in maniera in-

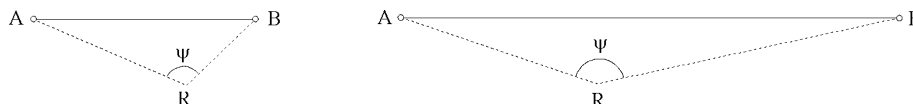


Figura 4.7 – L'angolo ψ aumenta con l'aumentare della lunghezza della linea di base

versamente proporzionale all'angolo); questa condizione si verifica quando la distanza tra le stazioni è grande (fig. 4.7).

4.3 Il Loran C

Il *Loran C* è un sistema di radionavigazione iperbolica a treni d'impulsi (*pulse group*) operante con una frequenza portante f , comune a tutte le stazioni, uguale a 100 kHz. Il sistema è gestito dalla *U.S. Coast Guard* americana.

Le basse perdite di propagazione delle onde *LF*, specialmente sul mare, rendono possibile il conseguimento di notevoli portate (fino a 1200 NM) consentendo l'adozione di linee di base molto più lunghe rispetto al vecchio sistema *Loran A* con conseguente miglioramento della geometria del sistema in un'area molto più vasta. La linea di base di maggiore lunghezza (circa 1000 NM) si trova nella catena North West Pacific.

L'emissione di treni d'impulsi, inoltre, evita l'impiego di potenze elevate in quanto in ricezione si adotta una tecnica particolare, detta di *compressione degli impulsi*, che consente di sommare nel ricevitore la potenza di ciascun impulso consentendo la ricezione di segnali anche di debole ampiezza.

Le potenze di trasmissione dipendono dall'estensione dell'area di copertura: esse vanno da 10 fino a 1600 kW; le antenne impiegate sono del tipo a traliccio con altezze variabili da 625 fino a 1000 ft (fig. 4.8).

Il modo normale di propagazione dei segnali *Loran C* è quello superficiale (*GW = Ground Wave*) sebbene la propagazione ionosferica (*SW = Sky Wave*), presente giorno e notte, consentirebbe un aumento della portata a scapito, però, della precisione. La trasmissione a impulsi, come verrà mostrato più avanti, evita la sovrapposizione di *GW* e *SW*.

Una catena *Loran C* è costituita da una stazione principale o *Master (M)* e da almeno due stazioni secondarie contrassegnate dalle denominazioni: *Victor (V)*, *Whiskey (W)*, *Xray (X)*, *Yankee (Y)* e *Zulu (Z)*. Le stazioni secondarie sono la *X* e la *Y* se sono soltanto due, *X, Y, Z* se tre, *W, X, Y, Z* se quattro e *V, W, X, Y, Z* se cinque. Attualmente sono in funzione 27 catene *Loran C*.

La stazione principale e le stazioni secondarie di ciascuna catena trasmettono treni d'impulsi con lo stesso intervallo di cadenza noto con la sigla *GRI (Group Repetition Interval)*; tale parametro è l'unico che caratterizza la catena prescelta avendo tutte uguale frequenza di trasmissione.



Figura 4.8 – Antenna di una stazione *Loran C*

L'intervallo di cadenza deve avere lunghezza sufficiente in modo da contenere la durata di trasmissione del treno d'impulsi (10 000 μs per la *Master* e 8000 per ogni stazione secondaria), gli intervalli T corrispondenti alle lunghezze delle linee di base (possono arrivare fino a circa 6000 μs), e i *coding delays* (che variano da 11 000 fino a 70 000 μs).

In un primo momento gli intervalli di cadenza erano contrassegnati da due lettere (*cadenza fondamentale*) e da un numero (*cadenza specifica*) come dal seguente prospetto:

	SH	SL	SS
0	60 000	80 000	100 000
1	59 900	79 900	99 900
2	59 800	79 800	99 800
3	59 700	79 700	99 700
4	59 600	79 600	99 600
5	59 500	79 500	99 500
6	59 400	79 400	99 400
7	59 300	79 300	99 300

Per esempio l'intervallo di cadenza 79 900, assegnato alla catena *Mediterranean Sea*, era contraddistinto dalla sigla SL1. Attualmente, avendo utilizzato anche cadenze diverse da quelle elencate nel precedente prospetto, ciascuna catena viene identificata con le prime quattro cifre dell'intervallo di cadenza; per esempio la catena SL1 è ora nota come catena 7990.

Ogni stazione secondaria emette un gruppo di otto impulsi intervallati l'uno rispetto all'altro di 1000 μ s; la stazione principale è invece identificata, rispetto alle altre stazioni, da un nono impulso trasmesso 2000 μ s dopo l'ottavo (fig. 4.9). Il nono impulso, oltre a consentire, l'identificazione da parte del ricevitore *Loran* della stazione principale, è utilizzato anche per avvertire l'utente dei periodi nei quali la sincronizzazione tra le stazioni non è mantenuta. In tale periodo, infatti, il nono impulso subisce una manipolazione (*blinking*) secondo un codice riconoscibile da parte del ricevitore. Anche i primi due impulsi delle stazioni secondarie, da non utilizzare, sono sottoposti a variazioni che consentono al ricevitore il riconoscimento di esse.

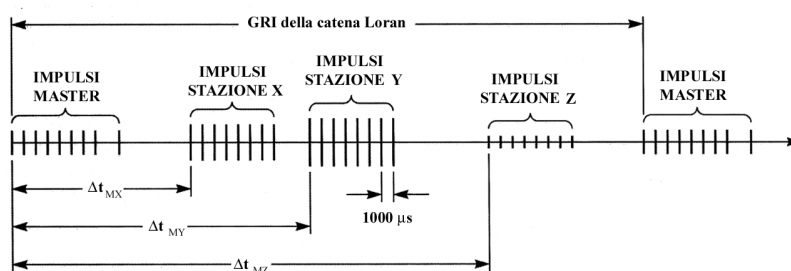


Figura 4.9 – Impulsi di una catena *Loran C*

Tutte le stazioni trasmettenti sono equipaggiate con orologi atomici al cesio sincronizzati su una scala comune dei tempi (*UT*) in modo che ogni stazione può inviare i propri impulsi secondo la *GRI* assegnata alla catena.

La stazione principale, a intervalli prestabiliti, trasmette i suoi nove impulsi; successivamente trasmettono, a turno, le stazioni secondarie dopo un intervallo di tempo $T + \delta$.

I *coding delays* assegnati alle stazioni secondarie devono essere tali che, qualunque sia la posizione del ricevitore nell'area di copertura della catena *Loran*, i segnali, per poter essere identificati dal ricevitore, si devono susseguire sempre nello stesso ordine e cioè:

- M, X, Y (se le stazioni secondarie sono due);
- M, X, Y, Z (se le stazioni secondarie sono tre);
- M, W, X, Y, Z (se le stazioni secondarie sono quattro);
- M, V, W, X, Y, Z (se le stazioni secondarie sono cinque).

Per esempio, alla catena 9610 (*South Central U.S.*), l'unica con cinque stazioni, sono assegnati i seguenti parametri:

Stazione	Coding delay δ	Intervallo T
Master/Boise City		
Victor/Gillette	11 000	2884.48
Whiskey/Searchlight	25 000	3611.81
Xray/Las cruces	40 000	2044.93
Yankee/Raymondville	52 000	4024.80
Zulu/Grangeville	65 000	4304.00

L'impulso *Loran* è ottenuto modulando in ampiezza la frequenza portante f secondo l'espressione:

$$A \left(\frac{t}{65} \right)^2 e^{2 \left(1 - \frac{t}{65} \right)} \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

dove A è l'ampiezza massima, t il tempo in μs , ω la pulsazione uguale a $2\pi f$ e φ è la fase che può essere 0 o π . Ciascun ciclo che compone l'impulso ha una durata (*periodo*) di $10 \mu\text{s}$.

L'involuppo dell'impulso ha una forma tale che la sua ampiezza cresce rapidamente raggiungendo il suo massimo valore dopo $65 \mu\text{s}$ per poi decrescere lentamente; dopo $400 \mu\text{s}$ l'ampiezza si può ritenere trascurabile divenendo uguale a circa 10^{-3} di A (fig. 4.10).

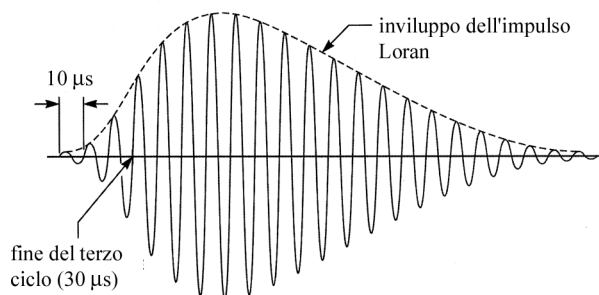


Figura 4.10 – Impulso *Loran C*

La fase φ , che può essere 0 o π , permette di codificare le trasmissioni delle stazioni; in tal modo il ricevitore riconosce gli impulsi anche in presenza di possibili interferenze con altri segnali o di onde ionosferiche.

A ciascuna stazione, infatti, è attribuita una prestabilita sequenza in cui la fase φ assume l'uno o l'altro valore: per $\varphi = 0$ il primo semiperiodo dell'impulso è positivo, per $\varphi = \pi$ si ha il contrario (fig. 4.11).

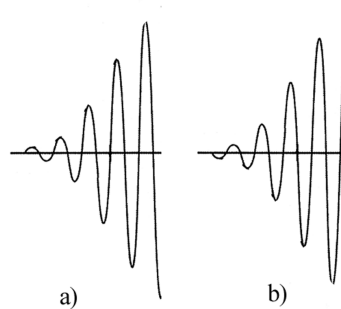


Figura 4.11 – Impulso Loran per $\varphi = 0$ (a) e per $\varphi = \pi$ (b)

Nel sistema russo, il *Chayka*, i segnali delle stazioni secondarie hanno tutti la stessa fase (0 o π) mentre la fase dei segnali della stazione principale differisce esattamente di 180° .

Nel caso in cui una stazione sia comune a più di una catena, si può verificare che i segnali emessi per ciascuna di esse si sovrappongano in alcuni istanti. È necessario, pertanto, sopprimere il segnale avente la più bassa priorità.

La massima priorità si ha quando la stazione è una *Master* per una delle due catene, in tal caso essa deve necessariamente emettere i segnali relativi al suo ruolo di *Master*; nel caso in cui la stazione sia *secondaria* per entrambe le catene, vengono trasmessi i segnali relativi alla stazione che ha il più grande *GRI*. La soppressione dell'impulso è nota con il termine *blanking*.

La successiva figura 4.12 mostra la rete di stazioni Loran C sul territorio degli Stati Uniti: dal maggio 1991 essa copre l'intera area continentale, dalle coste del Pacifico fino a quelle atlantiche, dalla zona settentrionale del Messico fino alla zona centrale del Canada.

Oltre alle catene relative al territorio degli Stati Uniti vi sono altre catene Loran C come si può vedere dalla tabella 4.1.

La catena del Mediterraneo originariamente era composta dalla stazione principale posta a Sellia Marina (Catanzaro) e da tre stazioni secondarie: Tripoli (Libia), Kargaburm (Turchia) e Estartit (Spagna).

In seguito alla crisi politica tra Libia e Stati Uniti, la stazione di Tripoli fu abbandonata e spostata a Lampedusa; attualmente sono in funzione soltanto la *Master* e la stazione X di Lampedusa.

Con la piena operatività del sistema satellitare *GPS*, la *U.S. Coast Guard* ha ritirato il proprio sostegno a tutte le stazioni *Loran C* operanti fuori del territorio degli Stati Uniti.

In Italia, dal gennaio 1995, il Corpo delle Capitanerie di Porto è succeduto, in forza di un accordo tra i governi statunitensi e italiano, alla *U.S. Coast Guard* nella gestione diretta delle stazioni *Loran C* situate su territorio nazionale e nel controllo delle stazioni dell'intera catena del Mediterraneo.

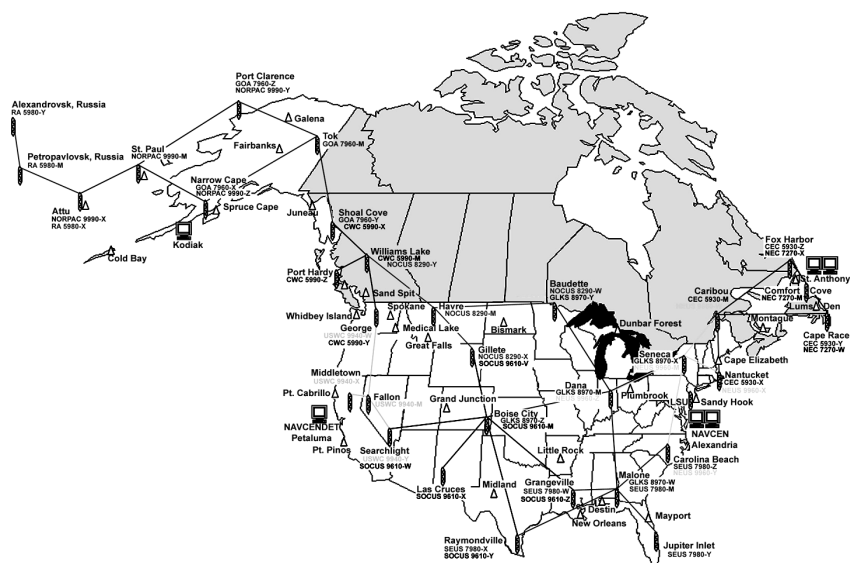


Figura 4.12 – Copertura *Loran C* in Nord America

Tabella 4.1 – Catene *Loran C*

Denominazione	GRI	Denominazione	GRI
Calcutta	5543	Mediterranean Sea	7990
Canadian East Coast	5930	Western Russian	8000
Russian-American	5980	North Central U.S.	8290
Canadian West Coast	5990	China East Sea	8390
Bombay	6042	Saudi Arabia North	8830
Lessay	6731	North West Pacific	8930
China South Sea	6780	Great Lakes	8970
Bø	7001	Eidi	9007
Saudi Arabia South	7030	South Central U.S.	9610
Newfoundland East Coast	7270	East Asia	9930
China North Sea	7430	U.S. West Coast	9940
Eastern U.S.S.R Chayka	7950	Northeast U.S.	9960
Gulf of Alaska	7960	North Pacific	9990
Southeast U.S.	7980		

4.4 Misure Loran C

La determinazione della posizione con il *Loran C* viene effettuata misurando la differenza di tempo tra l'arrivo dell'impulso della stazione principale e gli impulsi provenienti da almeno due stazioni secondarie. Tale differenza, per la (4.5), è data, per esempio, per la coppia *M-X*, da:

$$\Delta t_{MX} = T_X + \delta_X + t_X - t_M$$

dove: T_X rappresenta il tempo che impiegherebbe il segnale emesso dalla *Master* a raggiungere la stazione *Slave X*, ossia la lunghezza della linea di base espressa in microsecondi e δ_X il *coding delay*; t_X e t_M il tempo impiegato dai segnali dalle stazioni *X* e *M* per raggiungere il ricevitore (fig. 4.13).

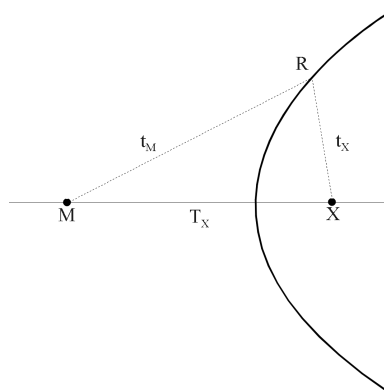


Figura 4.13 – Luogo di posizione nel sistema *Loran C*

Nei primi ricevitori la misura veniva effettuata con una tecnica definita *pulse envelope matching*: gli impulsi venivano visualizzati sulla traccia orizzontale di un tubo a raggi catodici; quelli relativi a ciascuna delle stazioni secondarie venivano traslati in modo da sovrapporsi agli impulsi provenienti dalla stazione principale: l'entità di tale spostamento misurava la differenza di tempo Δt .

Questa tecnica si prestava bene per il sistema *Loran A* che utilizzava impulsi di forma rettangolare di breve durata (40 μs) che consentivano di mantenere separati gli impulsi *GW* rispetto a quelli *SW* in quanto questi ultimi, dovendo percorrere una traiettoria più lunga, arrivavano con un ritardo quasi sempre maggiore di 40 μs (fig. 4.14).

Nel caso del *Loran C*, poiché gli impulsi hanno una durata di diverse centinaia di microsecondi, le *SW* si sovrappongono sempre con le *GW* dando luogo a segnali il cui involuppo presenta un aspetto diverso da quello illustrato nella figura 4.10 rendendo difficile la collimazione e imprecisa la misura.

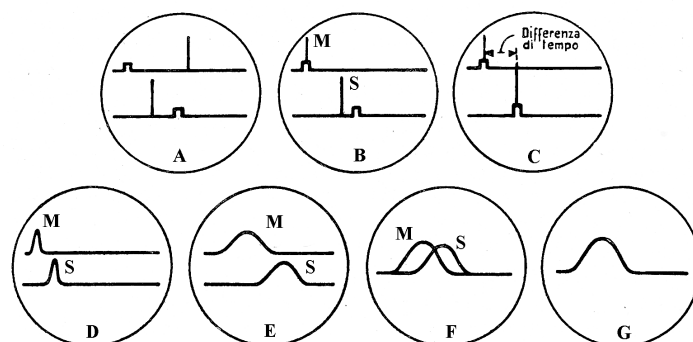


Figura 4.14 – Misura della differenza di tempo con il sistema *Loran A*: i due impulsi provenienti dalla stazione principale *M* e dalla stazione secondaria *S* venivano slittati fino a coincidere con due piedistalli (A, B, C), poi ingranditi (D, E), sovrapposti (F) e resi infine coincidenti (G)

La tecnica utilizzata nel *Loran C* è definita con termine *cycle matching*: essa consiste nell'individuare per ciascun impulso i primi tre cicli che, avendo una durata di 30 μs , sicuramente non sono contaminati dalle onde ionosferiche.

L'individuazione è resa possibile paragonando l'involuppo della parte iniziale dell'impulso ricevuto con un involuppo teorico generato dal ricevitore (*indexing*): è possibile in tal modo individuare il terzo ciclo di ciascun impulso e effettuare, oltre alla misura di differenza di tempo, anche una misura di differenza di fase tra essi.

Poiché ciascun ciclo ha la durata di 10 μs e la misura di differenza di fase si può effettuare con la precisione di un centesimo di ciclo, si può avere in un ricevitore professionale, in assenza di errori, una precisione di 0.1 μs pari a 30 m.

Un ricevitore *Loran C* deve svolgere le seguenti operazioni note con i termini: *initialization*, *acquisition*, *identification* e *tracking*.

L'*inizializzazione* del ricevitore viene effettuata da parte del pilota che seleziona la *GRI* della catena (o delle catene) prescelta. Vi sono ricevitori che possono operare su una sola catena (*single-rate*) e altri che possono essere sintonizzati su due catene (*dual-rate*). Normalmente un ricevitore moderno è in grado di scegliere la coppia di stazioni che consente la migliore determinazione della posizione (*GDOP* minimo).

L'*acquisizione* dei segnali delle coppie di stazioni prescelte avviene in base ai codici degli impulsi selezionati che vengono confrontati con identici codici generati internamente al ricevitore.

L'*identificazione* del terzo ciclo di ciascun impulso, rispetto ai quali vanno eseguite le misure di differenze di tempo e di fase, viene effettuata assicurandosi dapprima che l'impulso ricevuto sia un segnale *GW* essendo questo, come già accennato, più stabile dei segnali *SW*. Di solito i segnali acquisiti dal ricevitore

sono quelli *SW* in quanto di maggiore ampiezza: il ricevitore deve, pertanto, identificare i segnali *GW* effettuando la ricerca in un intervallo, variabile da 30 a 60 μ s, antecedente l'arrivo degli impulsi *SW*.

Il ricevitore dopo avere effettuato la misura Δt , portando a collimazione i due cicli, deve eseguire una manovra di *tracking* che consiste nel mantenere automaticamente, senza l'intervento dell'operatore, la sincronizzazione tra i segnali anche quando l'aeromobile è in volo e variano le letture *Loran C*.

I moderni ricevitori *Loran* convertono le misure di differenze di tempo in differenze di distanze e da queste ultime calcolano le coordinate geografiche; inoltre, come ogni altro sistema di navigazione, l'apparato *Loran* fornisce i parametri utili per dirigere verso il punto di destinazione o verso il successivo *waypoint* (fig. 4.15).

Per trasformare le differenze di tempo in differenze di distanze è necessario conoscere la velocità di propagazione del segnale *Loran C*; essa differisce dalla velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto *c* in quanto, trattandosi di propagazione *GW*, è necessario considerare la conduttività del terreno sorvolato e l'azione dell'atmosfera.

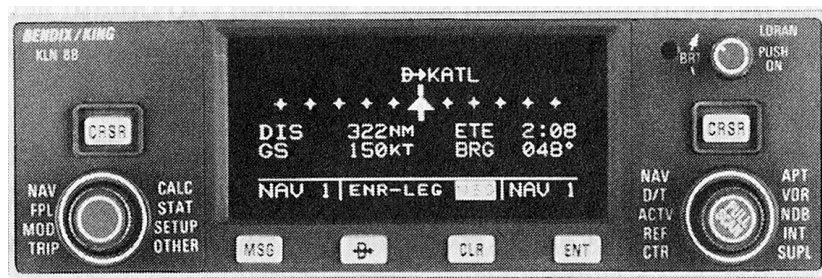


Figura 4.15 – Ricevitore *Loran C*

A tal fine è necessario apportare alla velocità *c* alcune correzioni:

- la prima correzione, detta *PF* (*Primary Phase Factor*), è dovuta al mezzo di propagazione (l'atmosfera anziché il vuoto); è necessario, pertanto, tenere conto dell'indice di rifrazione dell'atmosfera che è uguale a 1.000338.
- per la seconda correzione, detta *SF* (*Secondary Phase Factor*), si ipotizza che la traiettoria di propagazione del segnale si sviluppi tutta sul mare di cui sono assegnati i parametri relativi alla *conduttività*.
- infine, la terza correzione, detta *ASF* (*Additional Secondary Phase Factor*), tiene conto dell'effettiva natura della superficie sulla quale si sviluppa la traiettoria dei segnali *Loran*. I segnali sul terreno viaggiano più lentamente che sul mare a causa del diverso coefficiente di conduttività: a titolo d'esempio questo parametro, sul mare, è 10 000 volte maggiore rispetto al caso in cui la *GW* si propaga su rilievi coperti di neve.

Le prime due correzioni sono costanti mentre la terza, dapprima, veniva fornita da apposite tavole pubblicate dall'*U.S. Coast Guard* mentre, attualmente, viene calcolata nello stesso ricevitore tramite un algoritmo che divide la traiettoria seguita dal segnale in tante tratte per ciascuna delle quali si tiene conto della natura del suolo.

Le letture *Loran*, corrette per l'*ASF*, consentono una precisione nella determinazione della posizione di 0.25 NM nel 95% delle misure effettuate.

4.5 Precisione delle misure

Il *Loran C*, così come ogni altro sistema di navigazione, deve garantire agli utenti diversi requisiti allo scopo di essere classificato come un sistema affidabile.

Il primo requisito è quello della *precisione*: si è visto che tra gli inevitabili errori di misura x (espressi in microsecondi) e la conseguente incertezza e (espressa in NM) intercorre la relazione (4.6) che viene qui riportata:

$$e = \frac{1}{2} kx \operatorname{cosec} \frac{\psi}{2}$$

dove ψ è l'angolo sotto cui vengono sottese le due stazioni, e k una costante uguale a 0.162. Il rapporto:

$$F = e / kx = \frac{1}{2} \operatorname{cosec} \frac{\psi}{2}$$

si definisce *fattore di precisione* o *fattore di espansione dell'errore*; esso dipende esclusivamente dall'angolo ψ e, pertanto, i luoghi dei punti di uguale valore di F , sono curve lungo le quali ψ si mantiene costante. Esse possono essere tracciate sulla sfera terrestre e, per distanze limitate, possono approssimarsi a archi di circonferenza (fig. 4.16).

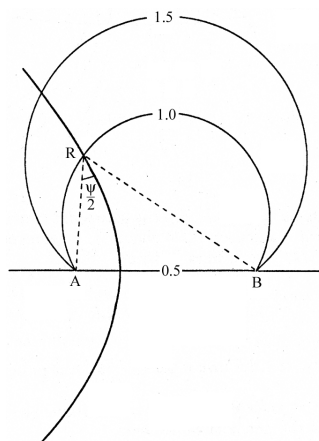


Figura 4.16 – Curve di uguale fattore di precisione

La determinazione della posizione viene effettuata dall'intersezione di due luoghi di posizione: nell'ipotesi in cui l'errore di misura x sia lo stesso sia nella misura della differenza di tempo tra la coppia MX , sia tra la coppia MY , un ricevitore posto nella zona (1) avrà un'incertezza accettabile a differenza di un ricevitore posto nella zona (2) (fig. 4.17).

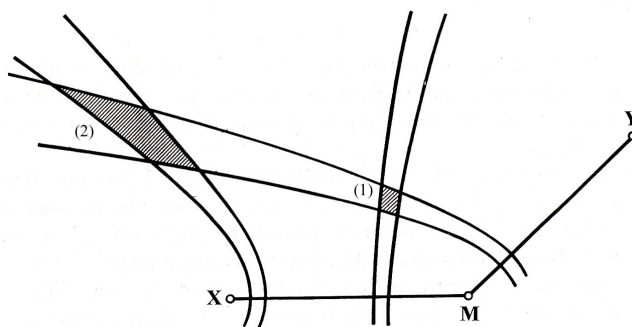


Figura 4.17 – Incertezza del luogo di posizione in due zone dell'area di servizio

Due luoghi di posizione, rispettivamente affetti da incertezze e_1 e e_2 , danno, pertanto, origine a un quadrilatero definito *quadrilatero d'incertezza* che può essere approssimato a un parallelogramma.

L'incertezza della posizione (definita come la distanza tra la posizione esatta e quella errata) risulta massima quando, rispetto alla posizione osservata O (intersezione delle iperboli), l'effettiva posizione cade in O' lungo la diagonale maggiore in uno dei vertici del parallelogramma di incertezza (fig. 4.18); essa è uguale a (cfr. *Navigazione aerea*, par. 6.8):

$$e = \frac{1}{\sin \alpha} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + 2e_1e_2 \cos \alpha}$$

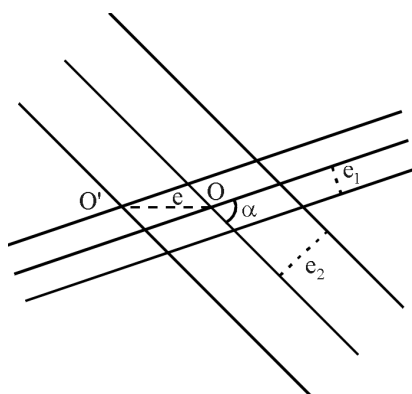


Figura 4.18 – Parallelogramma d'incertezza

Sostituendo alle incertezze e_1, e_2 le loro espressioni (4.6), si ha:

$$e = \frac{k}{2 \operatorname{sen} \alpha} \sqrt{\frac{x_1^2}{\operatorname{sen}^2 \frac{\psi_1}{2}} + \frac{x_2^2}{\operatorname{sen}^2 \frac{\psi_2}{2}} + \frac{2x_1x_2 \cos \alpha}{\operatorname{sen} \frac{\psi_1}{2} \operatorname{sen} \frac{\psi_2}{2}}} \quad (4.7)$$

dove l'angolo α , essendo le iperboli bisettrici delle congiungenti le coppie di stazioni (fig. 4.19), è uguale a:

$$\alpha = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}$$

Nel caso in cui gli errori x_1, x_2 sono uguali, la (4.7) diventa:

$$e = \frac{kx}{2 \operatorname{sen} \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}} \sqrt{\frac{1}{\operatorname{sen}^2 \frac{\psi_1}{2}} + \frac{1}{\operatorname{sen}^2 \frac{\psi_2}{2}} + \frac{2 \cos \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}{\operatorname{sen} \frac{\psi_1}{2} \operatorname{sen} \frac{\psi_2}{2}}} \quad (4.8)$$

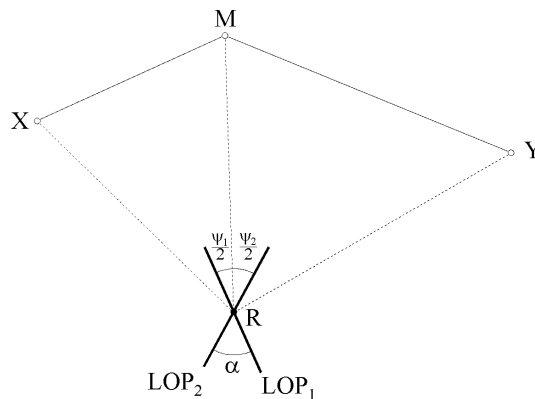


Figura 4.19 – Relazione tra l'angolo α e gli angoli ψ_1 e ψ_2

mentre il rapporto tra l'incertezza e e l'errore kx , simile al *fattore di espansione* già definito per un singolo luogo di posizione, è indicato con il termine *GDOP* (*Geometric Dilution of Position*) uguale a:

$$GDOP = \frac{1}{2 \operatorname{sen} \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}} \sqrt{\frac{1}{\operatorname{sen}^2 \frac{\psi_1}{2}} + \frac{1}{\operatorname{sen}^2 \frac{\psi_2}{2}} + \frac{2 \cos \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}{\operatorname{sen} \frac{\psi_1}{2} \operatorname{sen} \frac{\psi_2}{2}}} \quad (4.9)$$

Minore è il *GDOP* (che è un numero puro), minore è la ripercussione dell'errore di misura sull'incertezza della posizione.

In realtà la definizione del *GDOP*, ora data, non è del tutto corretta in quanto sarebbe stato necessario fare delle considerazioni di carattere statistico sugli errori di ciascuna misura che esulano dalla presente trattazione. Tuttavia l'espressione ricavata rappresenta ugualmente bene il concetto.

ESEMPIO 4.1

Determinare il GDOP, nell'ipotesi in cui gli errori su entrambe le misure Loran C siano uguali, in due diverse zone dell'area di servizio nelle quali:

$$\text{Area 1: } \psi_1 = 96^\circ; \quad \psi_2 = 68^\circ;$$

$$\text{Area 2: } \psi_1 = 36^\circ; \quad \psi_2 = 26^\circ.$$

L'esempio si riferisce alla rappresentazione già mostrata nella figura 4.17. Risolvendo la (4.9) per i due casi proposti, si ottiene:

$$\text{Area 1: } GDOP = 1.2; \quad \text{Area 2: } GDOP = 7.2.$$

Nel secondo caso un errore nella misura comporta un'incertezza nella posizione amplificata di 7.2 volte.

4.6 Caratteristiche operative del Loran C

Il sistema *Loran C*, così come ogni altro sistema di navigazione, per rispondere alle esigenze dell'aviazione civile, deve possedere i seguenti requisiti: copertura, precisione, disponibilità, affidabilità, integrità, non ambiguità, capacità.

Il *Loran C* non è un sistema a copertura globale come lo era l'*Omega* o come lo è il sistema satellitare *GPS*; le 27 catene riescono, tuttavia, a coprire ampie zone della superficie terrestre e in particolare le rotte aeree del nord Atlantico e del nord Pacifico.

La *precisione assoluta* del *Loran*, intesa come capacità del sistema di determinare la posizione rispetto a un sistema di coordinate legato alla Terra, come si è visto, dipende dalla distanza dalle stazioni, dalla geometria dei luoghi di posizione, dalle condizioni ambientali e dal rapporto segnale/rumore. Detta precisione, nel 95% delle misure, è dell'ordine di 0.25 NM.

Se, invece, dal ricevitore *Loran* vengono lette le coordinate geografiche di un punto di riferimento, il sistema è capace di ritornare nella medesima posizione con una precisione valutata tra 18 e 90 m in quanto si può ipotizzare che gli errori dovuti alla propagazione del segnale rimangano gli stessi. Questa proprietà del *Loran* è nota col termine *ripetibilità*.

La precisione assoluta può essere migliorata facendo ricorso al *Loran C* differenziale che consiste nell'utilizzo di una stazione monitor al suolo per la quale

è stata calcolata la *TD* (*Time Difference*) relativa a una coppia di stazioni *Loran* essendo note le coordinate di dette stazioni e di quella monitor.

Le differenze tra la *TD* calcolata e quella osservata, trasmesse via radio, rappresentano le correzioni che gli utenti presenti nelle vicinanze della stazione devono apportare alle loro misure. Naturalmente, con l'aumentare della distanza tra la stazione monitor e l'utente, la precisione diminuisce in quanto le correzioni possono essere ritenute stazionarie soltanto entro un raggio di 100 NM.

La *disponibilità* (*availability*) è espressa dalla percentuale di tempo con la quale il sistema è in grado di fornire le normali precisioni; essa deve essere il più possibile vicina al 100% in quanto in alcune fasi del volo non possono essere tollerate improvvise cadute di precisione. La disponibilità attualmente assicurata dal sistema *Loran* è intorno al 99.9%.

L'*affidabilità* (*reliability*) è legata alla frequenza con la quale si possono produrre disfunzioni del sistema; un sistema è tanto più affidabile quanto minori sono le possibilità di avaria. Le stazioni *Loran* sono continuamente monitorate e non appena un componente va fuori uso è prevista l'entrata in servizio di un componente di riserva.

L'*integrità* (*integrity*) è la capacità che deve avere un sistema di individuare rapidamente e indicare i difetti di funzionamento in modo che l'utente sia a conoscenza che il sistema non funziona con le normali specifiche.

Si è visto che i segnali delle stazioni secondarie vengono manipolati (*blinking*) per notificare all'utente che una coppia di stazioni non deve essere utilizzata. L'*U.S. Coast Guard* e la *FAA* stanno mettendo a punto un sistema in grado di avvisare l'utente, entro 10 s, di anomalie nella misura delle differenze di tempo eccedenti $\pm 0.5 \mu\text{s}$ in modo da rendere il sistema *Loran C* affidabile anche nelle fasi di avvicinamento.

L'*ambiguità* nella determinazione della posizione si ha quando i luoghi di posizione presentano più di una intersezione; questo accade nel *Loran* ma la disposizione delle stazioni è progettata in modo tale che i punti capitano a grandi distanze e l'ambiguità può essere facilmente risolta con la conoscenza, anche grossolana, della posizione stimata.

La *capacità* è data dal numero di utenti che un sistema di navigazione può servire; nel caso del *Loran* è illimitata.

4.7 Il futuro del Loran C

La politica di esercizio dei sistemi di radionavigazione controllati dagli Stati Uniti è stabilita ogni due anni dal *Federal Radionavigation Plan (FRP)* edito congiuntamente dal *Department Of Defence (DOD)* e dal *Department Of Transportation (DOT)*.

Riguardo al *Loran C*, il *FRP* del 1999 ha confermato la continuità del sistema anche in futuro assicurando un ragionevole preavviso nel caso in cui il sistema dovesse essere abbandonato, in modo che gli utenti avranno l'opportunità di effettuare un periodo di transizione verso aiuti alla navigazione alternativi.

Nel documento è inserita, infatti, la seguente raccomandazione:

“In light of the 1999 FRP Loran C policy, all staffs and commands involved in Loran C operations, support and training should develop plans consistent with continued operation of the Loran system”.

Negli Stati Uniti vi è una forte resistenza a rendere il sistema *Loran C* inoperativo a favore di un solo sistema di navigazione (il *GPS*) per svariate ragioni:

- il sistema *Loran* comporta costi contenuti rispetto ai sistemi satellitari;
- il sistema *Loran* presenta il requisito dell'integrità senza costi aggiuntivi a differenza del sistema *GPS* per il quale sono previsti forti investimenti per dotarlo di tale caratteristica;
- le stazioni *Loran* sono facilmente accessibili mentre la sostituzione di un satellite comporta un nuovo lancio e conseguenti maggiori investimenti;
- i segnali *GPS* sono soggetti a interferenze casuali o a disturbi artificiali (*jamming*) provocate volutamente per degradare le prestazioni del sistema;
- le frequenze *Loran* consentono, a differenza di quelle del *GPS*, una buona copertura anche nelle zone urbane o nei luoghi chiusi;
- le stazioni *Loran* possono essere usate anche per trasmettere i segnali di integrità del sistema *GPS*.

Ci si augura, pertanto, che il *Loran C* continuerà a essere operativo per i prossimi anni sia come sistema di riserva (*backup system*) sia come componente di un sistema integrato *GPS-Loran* in grado di sfruttare al massimo i vantaggi dell'uno o dell'altro sistema.