

14. AVIONICA

14.1 Introduzione

Per *avionica* si intende l'insieme delle apparecchiature elettroniche impiegate a bordo di un velivolo; i maggiori componenti dell'avionica sono le apparecchiature di comunicazione, di navigazione ed i calcolatori di bordo.

Le funzioni demandate all'avionica sono in questi ultimi anni cresciute in modo enorme; questo è stato possibile sia per gli sviluppi tecnologici che hanno portato alla miniaturizzazione dei circuiti ed alla loro capacità di lavorare a frequenze sempre più elevate, sia allo sviluppo delle metodologie digitali, che ha consentito di raggruppare in un numero limitato di apparecchiature funzioni che, con le metodologie analogiche, dovevano essere svolte da apparecchiature differenziate. Le metodologie digitali, oltre a minimizzare il numero di unità necessarie per svolgere determinate funzioni, hanno anche il grosso vantaggio di diminuire il numero di collegamenti fra le varie apparecchiature mediante l'impiego di bus di comunicazione condivisi fra diverse funzioni. La miniaturizzazione e le maggiori capacità disponibili in pratica hanno portato ad un aumento delle funzioni svolte per via elettronica, senza incrementi di pesi e necessità di energia per il loro funzionamento; nei casi dove questo aumento non è sfruttato si ha però avuto un sensibile guadagno di peso.

14.2 Comunicazioni

I piloti hanno la necessità di comunicare dal loro velivolo con l'esterno in tutte le fasi della loro missione, ad esempio: durante il decollo con la torre di controllo, durante il volo con il centro di controllo dello spazio aereo, in avvicinamento e all'atterraggio con l'aeroporto di arrivo.

I collegamenti tra il velivolo e terra o tra velivolo e velivolo debbono necessariamente avvenire attraverso *radio*, sfruttando quindi un *campo elettromagnetico*.

14.2.1 Campo elettromagnetico

Il campo elettromagnetico viene creato inviando in un conduttore una corrente elettrica alterata; di questa una parte viene trasformata in campo elettromagnetico e propagata nello spazio; se questa raggiunge un conduttore, si genera in esso una corrente elettrica che ha caratteristiche di frequenza uguali a quella della corrente iniziale.

L'onda elettromagnetica è composta dall'insieme di un campo elettrico e di un campo magnetico rappresentabili con vettori perpendicolari fra loro e su un piano normale alla direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica stessa.

Utilizzando un'antenna verticale si genera un campo elettromagnetico in cui il campo elettrico è verticale, un campo quindi polarizzato verticalmente; una antenna ricevente è in grado di captare il segnale solo se anch'essa è verticale.

L'onda elettromagnetica trasmessa è caratterizzata da *ampiezza, frequenza, lunghezza d'onda e velocità di propagazione*.

Frequenza f , lunghezza d'onda λ e velocità di propagazione c sono fra loro legate dalla relazione:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

La velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto è uguale alla velocità della luce (300000 km/s); nell'atmosfera la velocità è solo leggermente inferiore. La lunghezza d'onda in metri è quindi data da:

$$\lambda[m] = \frac{300}{f[MHz]}$$

Le frequenze utilizzate per le comunicazioni cadono in ben precise bande internazionali, definite come nella tab. 14.1, sebbene i limiti non siano molto rigidi:

Banda di frequenza	Designazione	Frequenza	Lunghezza d'onda
Very Low Frequency	VLF	3 - 30 kHz	100 - 10 km
Low Frequency	LF	30 - 300 kHz	10 - 1 km
Medium Frequency	MF	300 - 3000 kHz	1000 - 100 m
High Frequency	HF	3 - 30 MHz	100 - 10 m
Very High Frequency	VHF	30 - 300 MHz	10 - 1 m
Ultra High Frequency	UHF	300 - 3000 MHz	100 - 10 cm
Super High Frequency	SHF	3000 - 30000 MHz	10 - 1 cm
Extremely High Frequency	EHF	30000 - 300000 MHz	10 - 1 mm

Tab. 14.1 - Bande di frequenza

In aeronautica si utilizzano il VHF (33-88 MHz per il militare e 108-156 MHz per il civile) e l'UHF, o meglio una zona a cavallo tra il VHF e l'UHF (225-400 MHz per il militare).

La propagazione avviene in linea retta ma può essere alterata nel suo percorso dai diversi componenti dell'atmosfera; viene comunque attenuata in modo dipendente dalla sua frequenza, ovvero al crescere della frequenza cresce l'attenuazione.

Per frequenze decisamente basse (< 3 MHz) l'onda elettromagnetica può subire delle rifrazioni dall'atmosfera in genere, o riflessioni dalla ionosfera, che le consentono di seguire la curvatura terrestre e quindi è possibile la trasmissione tra stazioni radio a grande distanza, ammesso di disporre di un'elevata potenza dell'apparato: si possono raggiungere distanze di 1000 miglia in MF e di alcune migliaia di miglia in VLF. Tuttavia le onde a bassa frequenza vengono molto disturbate dalle scariche atmosferiche.

La propagazione alle alte frequenze ha invece l'inconveniente di consentire il collegamento solo fra stazioni in vista, ma d'altra parte richiede una potenza decisamente più bassa e la trasmissione non è disturbata dai fenomeni atmosferici.

14.2.2 Componenti di un impianto di comunicazione

Un sistema di comunicazione è costituito da:

- Microfono/cuffia
- Impianto audio
- Ricetrasmittitore
- Quadro di controllo
- Antenna

Il *microfono* trasforma le onde sonore in segnali elettrici; l'*impianto audio* gestisce tutti i segnali audio a bordo del velivolo (anche di apparati diversi); il *trasmettitore* converte il segnale elettrico da frequenza audio alla frequenza necessaria per la trasmissione secondo la modalità e la frequenza impostata nel *quadro di controllo* e la invia all'*antenna*.

L'apparato ricevente ha gli stessi blocchi e le stesse funzioni svolte in senso inverso.

Il tipo più semplice di antenna è costituito da un conduttore nel quale viene fatta circolare una corrente alternata; per un funzionamento ottimale l'antenna deve avere una lunghezza pari alla lunghezza d'onda da trasmettere o ricevere, ma alle basse frequenze questo può essere proibitivo ed allora si ammettono lunghezze di antenna pari alla metà o ad un quarto dell'onda, perdendo sempre più di efficienza.

Un'antenna ideale propaga potenza in modo isotropo e quindi, in ogni direzione, la densità di potenza diminuisce con il quadrato della distanza; è però possibile costruire antenne che abbiano direzioni privilegiate di trasmissione e quindi avere in certe direzioni un guadagno; a pari potenza di trasmissione è quindi possibile avere in certe direzioni una densità di potenza decisamente più elevata di quella che si avrebbe con l'antenna isotropa.

L'antenna risente inoltre della sua installazione e della presenza di oggetti nelle sue vicinanze: tipicamente un'antenna per comunicazioni velivolo-terra dovrà essere posta nella parte inferiore del velivolo.

Oltre alla forma e costruzione dell'antenna è quindi fondamentale la sua installazione, che può essere studiata teoricamente, ma deve essere comunque ottimizzata in fase di messa a punto del velivolo durante le prove di volo.

Su un velivolo sono inoltre presenti più antenne, le quali hanno effetti di interferenza fra loro; spesso le antenne riceventi e trasmettenti sono separate fra loro per consentire dialogo contemporaneo nei due sensi, ma a volte le interferenze fra loro sono così forti che è necessario tacitare l'ascolto durante le trasmissioni.

Anche se teoricamente l'antenna dovrebbe avere un ben preciso rapporto di lunghezza rispetto la lunghezza d'onda trasmessa, essa è in grado di funzionare efficacemente in una certa gamma di frequenze. Esistono anche antenne in grado di funzionare su larghe bande di frequenza mediante un'*accordatura* elettronica eseguita automaticamente.

14.2.3 Modulazione di portanti

Un trasmettitore è un dispositivo in grado di elaborare l'informazione da trasmettere in modo da ottenere un'*onda portante*, di requisiti di frequenza e potenza adatti per poter essere trasformata in campo elettromagnetico attraverso l'antenna; il ricevitore dovrà essere in grado di eseguire la funzione inversa e riottenere quindi l'informazione trasmessa.

La necessità di questa trasformazione è legata al fatto che il segnale che si vuole trasmettere è di frequenza molto bassa: una sua trasmissione diretta avverrebbe quindi con lunghezze d'onda molto elevate e sarebbero necessarie antenne di dimensioni inaccettabili; inoltre le onde di bassa frequenza subiscono un'attenuazione molto forte e richiederebbero potenza di trasmissione elevatissima.

Si ricorre quindi ad un'operazione detta di *modulazione* che consiste nel modificare un'onda di alta frequenza in base alle informazioni da trasmettere.

Come schematizzato in fig. 14.1, l'onda portante viene generata da un *oscillatore*, amplificata perché altrimenti troppo debole per la trasmissione e modificata attraverso il modulatore.

Parallelamente il segnale audio viene tradotto in segnale elettrico ed amplificato, e quindi inviato a modulare la portante. Il tutto è di nuovo amplificato per essere poi trasmesso. Accanto a questi elementi occorrerà un *alimentatore* per fornire la potenza necessaria ai valori di tensione richiesti dai vari componenti.

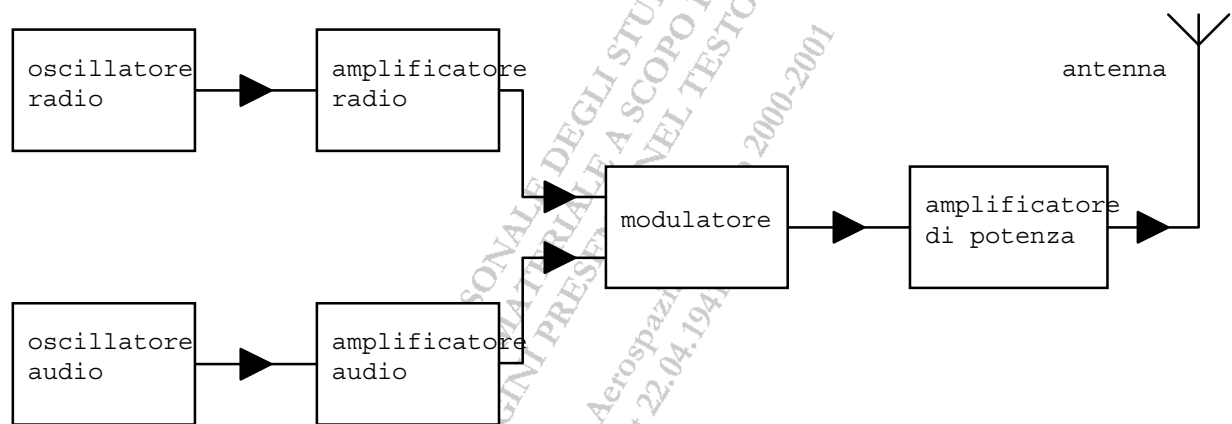


Fig. 14.1 - Schema impianto radiotrasmittente

La modulazione può essere tale da variare l'ampiezza dell'onda portante o da variarne la frequenza.

Nella *modulazione di ampiezza* l'ampiezza dell'onda risultante varia fra un minimo ed un massimo in funzione dell'ampiezza dell'onda modulante, ossia del segnale audio da trasmettere. Il risultato è rappresentato in fig. 14.2.

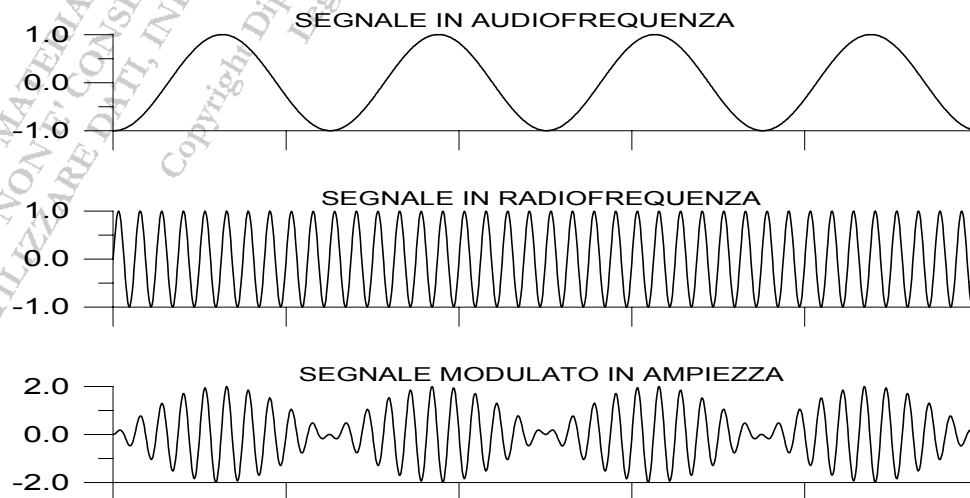


Fig. 14.2 - Modulazione di ampiezza

Si definisce *profondità di modulazione* il rapporto fra l'ampiezza dell'onda modulante e quella dell'onda portante.

Considerando un'onda modulante sinusoidale, con profondità di modulazione del 100% l'ampiezza dell'onda risultante arriva ad un minimo di zero, mentre con profondità minore ha sempre un valore positivo e con profondità maggiore si ha perdita di informazione.

La modulazione in ampiezza di una onda a frequenza f_p con un segnale a frequenza f_m genera un'onda con le frequenze $f_p - f_m$, f_p e $f_p + f_m$; in realtà il segnale da trasmettere è sempre un segnale composto e quindi sarà necessaria una certa *larghezza di banda* attorno alla frequenza fondamentale della portante. Per la voce umana si hanno contributi in frequenza significativi da 300 a 3000 Hz; una trasmissione a 7MHz richiede quindi una banda di frequenze da 6997 a 7003 kHz. In pratica si ammette una frequenza massima per la voce di 4500 Hz e quindi la trasmissione deve avvenire con una larghezza di banda (canale) di 9000 Hz. Le frequenze utilizzate per la trasmissione devono quindi essere fra loro separate di almeno 9 kHz. Per la trasmissione di musica è necessaria una maggiore larghezza di banda, tra i 10 e i 15 kHz.

Nella *modulazione di frequenza* invece l'ampiezza dell'onda risultante viene mantenuta costante mentre la sua frequenza viene variata in funzione del segnale da trasmettere, come indicato in fig. 14.3.

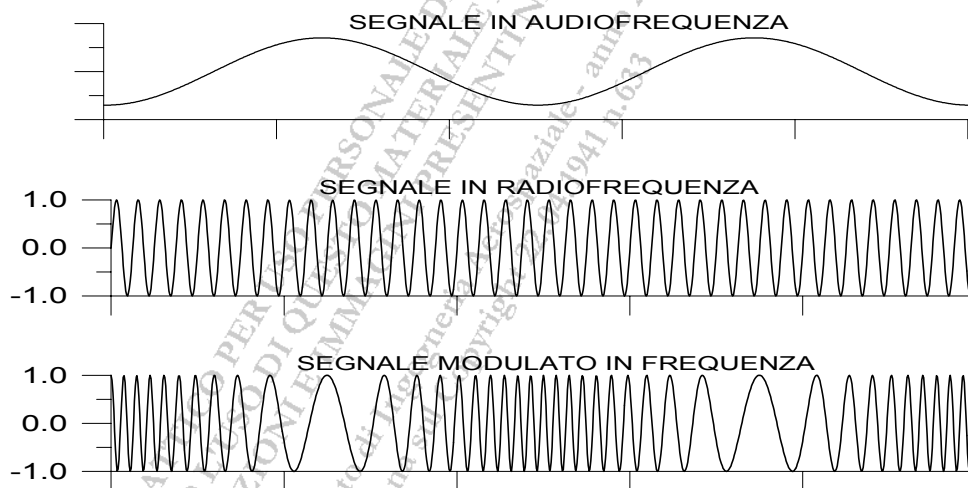


Fig. 14.3 - Modulazione di frequenza

Le variazioni di frequenza sono funzione dell'ampiezza del segnale modulante. Si considera modulato al 100% una portante nella quale si abbia una deviazione di frequenza di 75kHz.

Se il segnale modulante è un'onda sinusoidale di frequenza f_m , e la portante ha frequenza f_p , il segnale risultante possiede le frequenze $f_p \pm i \cdot f_m$ con larghezza di banda teoricamente infinita; in realtà al crescere di i l'ampiezza cala in modo tale da poter trascurare le frequenze al di fuori di una banda limitata attorno alla frequenza portante, se pur maggiore di quella che si otterrebbe in modulazione di ampiezza. Le trasmissioni ad onde medie e basse (MF e LF) sono sempre modulate in ampiezza poiché esse sono a lunga distanza e quindi, per ridurre interferenze, è bene contenere la larghezza di banda.

L'oscillatore che genera la frequenza portante deve possedere una buona stabilità; gli amplificatori di potenza devono essere tali da non deformare il segnale amplificato, l'amplificatore finale deve avere una potenza sufficiente. Le potenze dei trasmettitori usati a bordo vanno dalla decina al centinaio di Watt.

I ricevitori devono eseguire le funzioni inverse; a questo scopo è necessario prima di tutto captare dall'antenna la banda di frequenza di interesse e successivamente da questa ricavare il segnale utilizzato per la modulazione del segnale trasmesso.

I circuiti rivelatori sono circuiti che entrano in risonanza ad una certa frequenza e quindi sono in grado di captare dall'antenna segnali anche molto deboli ed inviarli, dopo un'opportuna amplificazione, al demodulatore.

Le caratteristiche importanti dei ricevitori sono la *sensibilità* (capacità di ricevere segnali anche molto deboli), la *selettività* (gamma di frequenza ai quali sono sensibili) e la *stabilità*.

La sensibilità deve essere molto alta per poter ricevere segnali anche molto deboli; occorre però fare attenzione che i segnali da ricevere possono avere intensità talmente bassa da richiedere un'amplificazione di milioni di volte: amplificazioni di tale tipo rendono sensibili anche i rumori di fondo presenti in tutti i circuiti elettronici; è necessario quindi che l'amplificazione sia tale da aumentare il rapporto segnale/rumore il più possibile.

La selettività deve essere tale da amplificare solo la banda necessaria attorno alla frequenza portante e tagliare il più possibile le frequenze al di fuori di questo campo, che costituirebbero solo una distorsione dell'informazione trasmessa.

Le frequenze utilizzate sono nelle bande:

VHF Low	30-88 MHz	Modulazione frequenza
VHF High	108-156 MHz	Modulazione ampiezza
Marittima	156-174 MHz	Modulazione frequenza
UHF	225-400 MHz	Modulazione ampiezza e frequenza

I canali prevedono una separazione 25 kHz per un totale di 11960 canali.

I ricetrasmittitori moderni sono in grado di lavorare su tutte le gamme di frequenza, riunendo quindi in un'unica apparecchiatura tutto ciò che una volta faceva parte di diversi apparati; essi consentono inoltre di preimpostare un certo numero di canali, o di selezionare direttamente una determinata frequenza. La potenza di trasmissione è dell'ordine della decina di Watt, la sensibilità in ricezione è dell'ordine dei microvolt.

14.3 Radar

Il *radar* (Radio Detecting And Range) è un sistema che consente di determinare la presenza e la posizione di un obiettivo.

Il principio fondamentale sul quale si basa è il rilevamento della riflessione delle onde radio che investono un ostacolo; se si dispone di una antenna direzionale, oltre alla presenza dell'obiettivo, è possibile determinarne la posizione angolare (fig. 14.4); inoltre, se si riesce a misurare il tempo impiegato dall'onda radio a raggiungere l'ostacolo e a tornare, se ne può determinare la distanza; infine, se è possibile sfruttare l'effetto Doppler sulla frequenza del segnale, si può misurare la velocità relativa rispetto all'obiettivo, o rimuovere l'eco di ostacoli fissi.

Tutte le caratteristiche sopra elencate sono sfruttate in vari modi da diversi tipi di Radar.

Un aspetto tipico del Radar è il fatto che, siccome la frequenza dell'onda riflessa, a parte scostamenti dovuti all'effetto Doppler, è identica a quella dell'onda trasmessa, occorre distinguere l'onda inviata da quella ricevuta e quindi la trasmissione deve avvenire per brevi periodi, ponendo poi l'apparecchiatura in ascolto per un tempo legato alla portata massima possibile del Radar. Schematicamente i componenti sono quelli rappresentati in fig. 14.5.

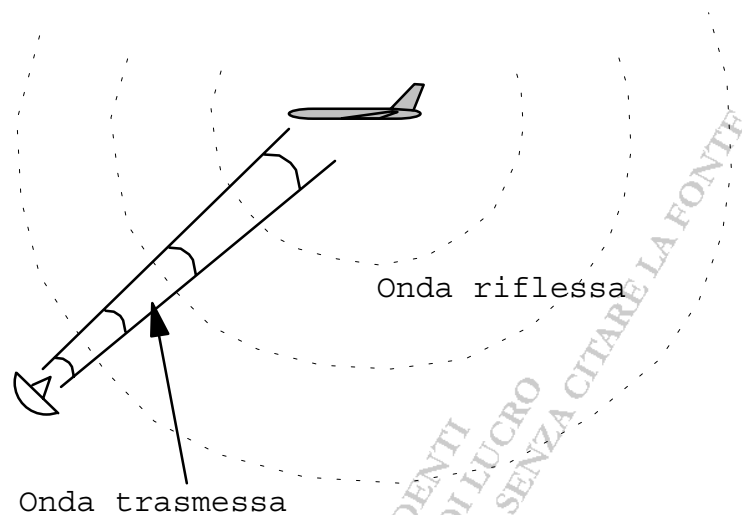


Fig. 14.4 - Radar, onde trasmesse e riflesse

Il trasmettitore genera l'energia in radiofrequenza necessaria al funzionamento. La potenza va da qualche watt del radar-altimetro alle decine di kilowatt dei potenti radar di terra. Le tensioni possono raggiungere qualche kV. Il segnale passa attraverso un interruttore che evita la trasmissione contemporanea alla ricezione, e quindi attraverso un dispositivo mobile, definito scanner, che sostiene ed orienta l'antenna, la quale emette un fascio molto stretto.

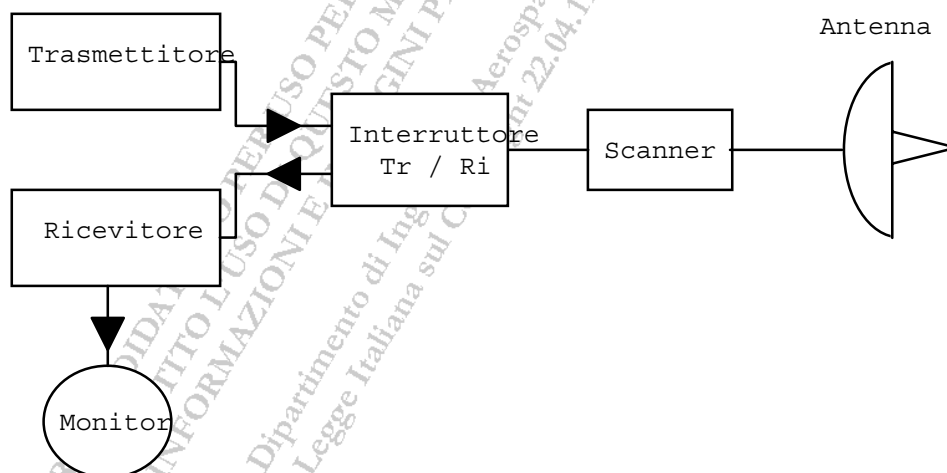


Fig. 14.5 - Componenti radar

Durante la trasmissione la densità di potenza del segnale si riduce con l'inverso del quadrato del percorso; il segnale viene inoltre ridotto per assorbimento atmosferico. Una quantità piccola incide l'obiettivo, che in parte lo assorbe ed in parte lo riflette in varie direzioni; dopo l'ulteriore decadimento del segnale, un residuo molto limitato torna all'antenna radar e quindi al ricevitore. Qui il segnale viene amplificato e filtrato dai vari rumori che si sono inevitabilmente introdotti.

Il radar opera normalmente con frequenza fra 100 e 1000 MHz; la trasmissione è per periodi dell'ordine dei microsecondi: per un radar con portata d , detta c la velocità di propagazione del segnale radio, il numero n di impulsi al secondo che si possono trasmettere è dato da:

$$n = c / 2d,$$

che, se ad esempio $d = 50$ km, dà $n = 3000$.

La portata massima del radar dipenderà dalla potenza di trasmissione; esiste comunque anche un valore di portata minima legata alla durata della trasmissione: infatti un ostacolo troppo vicino provoca un'eco che ritorna prima che l'apparecchiatura possa essersi messa in ascolto.

Il fatto che il radar trasmetta per periodi di tempo molto brevi implica il fatto che esso richiede una potenza molto elevata per tempi brevi; il rapporto fra potenza di picco e potenza media è quindi molto elevato e questo fatto può essere sfruttato per costruire radar con potenza di emissione molto elevata rispetto alla potenza assorbita.

La distanza dell'ostacolo viene individuata dal tempo intercorso fra l'invio del segnale e la ricezione dell'eco. La posizione angolare viene individuata costruendo antenne con fascio molto stretto e muovendole meccanicamente. Se l'obbiettivo è in movimento con velocità v , la risposta ha una variazione di frequenza Δf dovuta all'effetto Doppler, rispetto alla frequenza di trasmissione f_t , data da:

$$\Delta f = 2 \cdot f_t \cdot v / c.$$

Questo scostamento in frequenza è misurabile, per cui è possibile eliminare gli echi che non hanno scostamenti di frequenza e quindi eliminare quelli degli ostacoli fissi.

La presentazione del radar è normalmente su uno schermo circolare il cui centro rappresenta la posizione della stazione radar e gli ostacoli vengono segnalati con punti di intensità proporzionale alla potenza dell'eco e la cui posizione identifica sia la direzione che la distanza dell'ostacolo.

Questo vale per i radar che eseguono la ricerca sui 360° , ma si possono anche avere radar con spostamento verticale dell'antenna, o con scansione attorno ad una certa direzione. Il primo tipo, ruotante attorno ai 360° , è quello normalmente usato nelle stazioni di terra per il controllo dello spazio aereo; il secondo può essere utilizzato in direzioni prefissate per ottenere la quota dell'obiettivo; il terzo è usato per esempio nei radar di bordo. Questi ultimi possono essere utilizzati per l'individuazione di ostacoli fissi o mobili oppure per rilevazioni meteorologiche.

14.4 Tipi di radar

Il tipo di radar fin qui descritto va sotto il nome di *radar primario*; questo non dà nessuna informazione sul tipo di obiettivo illuminato, ed in particolar modo non distingue né identifica i velivoli. Un tipo di radar comunemente impiegato per questo scopo è il *radar secondario*: il velivolo obiettivo deve essere dotato di un *transponder*, cioè di un apparecchio che riceve il segnale radar e risponde con un segnale codificato contenente una identificazione del velivolo, ed eventualmente la sua quota grazie ad una capsula aneroide integrata nel transponder. La risposta può avvenire all'arrivo del segnale dal radar primario, ma generalmente si preferisce utilizzare un radar secondario con frequenze diverse ed impulsi di durata più lunghi in modo da poterli distinguere da quelli del radar primario. Il radar secondario è di grande utilità nel controllo del traffico aereo in cieli affollati o in prossimità di aeroporti importanti, poiché permette una continua monitoraggio ed identificazione del traffico aereo.

Come accennato poco sopra, esiste a bordo il *radar meteorologico*, che si basa sul fatto che le gocce d'acqua presenti nell'atmosfera riflettono le onde radio. La riflessione più forte si otterrebbe per lunghezze d'onda paragonabili alle dimensioni delle gocce, ma questo tipo di radiofrequenza si degraderebbe molto rapidamente nell'atmosfera e non permetterebbe di indivi-

duare i nuclei dei temporali, che sono la principale insidia meteorologica. Si lavora quindi su frequenze tra i 5 e i 10 GHz.

Per la misura della quota di volo vengono spesso utilizzati i *radar altimetri*. Un radar con emissione verticale permette infatti una misura precisa della distanza dal suolo e addirittura può portare ad un atterraggio di tipo completamente strumentale. Infatti questi radar sono di solito progettati per quote inferiori ai 5000 ft. La portata limitata, associata al fatto che la superficie riflettente è vasta ed ortogonale al fascio, permette l'utilizzo di basse potenze, attorno al watt. Il fascio non è molto stretto, per fornire una lettura soddisfacente anche con elevati angoli di manovra.

14.5 Navigazione

Il termine *navigazione*, di origine marina, viene utilizzato anche in campo aeronautico per indicare le operazioni necessarie a conoscere la propria posizione e la rotta da seguire per giungere alla destinazione voluta.

La posizione sulla superficie terrestre è definita attraverso due coordinate, che possono essere coordinate assolute quali latitudine e longitudine o coordinate relative rispetto ad un punto noto.

Si possono distinguere due modi fondamentali di navigazione:

- *navigazione autonoma*;
- *navigazione radioassistita*.

Nel primo modo il velivolo possiede a bordo tutte le apparecchiature necessarie a stimare il punto, nel secondo il sistema di identificazione della posizione è basato su un certo numero di stazioni di terra o su satelliti, che trasmettono informazioni per via radio.

Entrambi i sistemi sono utilizzati sia in campo civile che militare; ovviamente per i velivoli militari è più importante poter essere autonomi, sia perché le stazioni di terra possono diventare non disponibili, sia perché l'emissione di segnali radio da parte del velivolo ne può rivelare la presenza.

Il traffico aereo moderno è talmente elevato da dover essere regolamentato e controllato; per questo motivo sono state definite le aerovie nelle quali i velivoli devono volare con determinate separazioni, in quota, in larghezza ed in distanza; per potersi mantenere correttamente nei limiti stabiliti è indispensabile avere apparecchiature in grado di fornire indicazioni sufficientemente accurate della posizione.

14.5.1 Radiogoniometri e ADF

L'impiego di antenne selettive alla direzione consente un rilievo della direzione di provenienza di emissione radio da parte di una stazione. E' così possibile costruire dei sistemi basati sull'impiego di radiofari con emissione uniforme in tutte le direzioni (NDB, Non Directional Beacons) ed avere a bordo un ricevitore associato a un'antenna direzionale, ossia in grado di individuare la direzione di provenienza del segnale. In sostanza questa antenna è costituita da un telaio di supporto chiuso che porta un avvolgimento della lunghezza necessaria; a seconda di come viene disposta entro al flusso elettromagnetico, sente un segnale forte o debole.

Il *radiogoniometro*, che in realtà non viene più usato in aeronautica, è costituito da una radio ricevente generalmente ad onde corte o medie (quindi di lungo raggio), un'antenna non direzionale ed una bussola con antenna direzionale. Il segnale radio trasmesso dal radiofaro contiene un segnale audio continuo ben udibile, che frequentemente viene interrotto per trasmettere, in morse, la sigla identificativa del radiofaro stesso. La radio viene sintonizzata su di esso grazie all'antenna non direzionale. Il radiogoniometro ha un utilizzo manuale: l'operatore dirige l'antenna direzionale di modo da ottenere il segnale audio minimo e a quel punto legge la direzione bussola.

L'ADF si basa sullo stesso principio, ossia viene utilizzata una coppia di antenne, una direzionale ed una non direzionale, ma il segnale contenuto nella trasmissione non viene udito da un operatore. Questo viene elaborato da un sistema di controllo che orienta l'antenna direzionale finché il segnale non è al minimo. A quel punto viene letta la direzione.

In entrambi i casi sono necessari almeno due radiofari per fare il punto. Altrimenti si utilizza un solo radiofaro se si deve fare rotta su di esso.

Sistemi di questo genere possono essere impiegati per navigazione con trasmettenti che abbiano portate di circa 150 miglia o per avvicinamento ad aeroporti con trasmettenti di portata inferiore.

14.5.2 VOR e DME

Il *VOR* (VHF Omni Range) è un sistema in grado di fornire l'angolo, rispetto al Nord, della retta congiungente la stazione di terra con il velivolo, la *radiale*. Il VOR identifica quindi il semipiano sul quale si trova il velivolo indipendentemente dalla sua quota, con la risoluzione di un grado.

Il principio di funzionamento del VOR è basato sull'emissione di due segnali; il primo è un impulso a frequenza costante e irraggiato in modo uniforme in tutte le direzioni (*segnale di riferimento*), il secondo è un segnale irraggiato su un fascio che ruota continuamente alla velocità costante di 1800 rpm, ovvero 30 Hz (*segnale variabile*). Tale trasmissione è ottenuta da un sistema non rotante, ovvero costituito da un gruppo di 4 antenne disposte a quadrato, più una centrale, polarizzate alternativamente di modo da emettere un segnale rotante oltre a quello omnidirezionale (fig. 14.6).

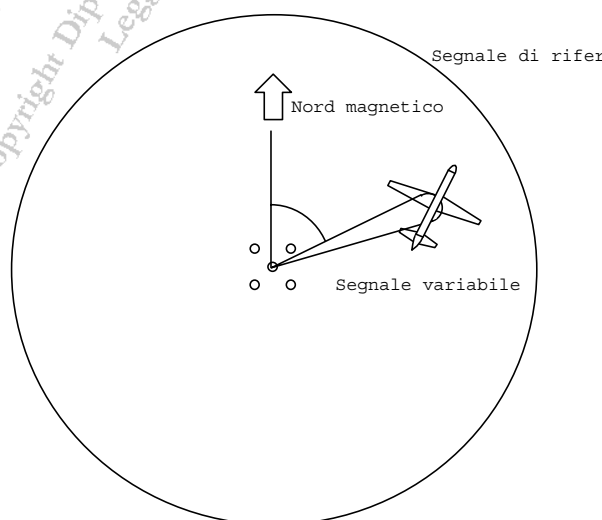


Fig. 14.6 - VOR

Il segnale di riferimento è emesso ogni volta che il segnale variabile passa per il nord magnetico; il primo ha fase costante tutt'intorno al radiofaro; il secondo ha uno sfasamento, rispetto al primo, variabile con l'orientamento; quindi un osservatore vede i due segnali con uno sfasamento che dipende dalla sua posizione angolare attorno alla stazione emittente.

Il segnale trasmesso ha una sua frequenza che viene modulata in ampiezza per quanto riguarda il segnale di riferimento omnidirezionale ed in frequenza per il direzionale.

L'onda trasmessa viene ricevuta da un'apparecchiatura di bordo in grado di riconoscere i due segnali, di calcolare lo sfasamento e quindi di fornire la radiale.

Essendo un sistema in VHF (tra i 108.00 e i 117.95 MHz), la portata d'esercizio varia tra le 40 e le 300 miglia, cioè è legata alla visibilità del velivolo da parte del sistema di trasmissione a terra, ovvero alla quota di volo.

Per calcolare il punto sono necessari almeno due VOR, di modo da poter fare una triangolazione. In genere però ad un VOR è associato un DME (Distance Measuring Equipment, banda UHF tra i 962 e i 1212 MHz) che permette di dare la distanza dal radiofaro stesso, rendendo inutile una triangolazione con un altro VOR. L'apparecchio DME di bordo invia un segnale che interroga la stazione a terra, chiamata *transponder*; il segnale è composto da una serie di impulsi generati con distanze di tempo casuali; il transponder risponde con un altro pacchetto di segnali nella stessa sequenza, di modo che esso venga riconosciuto dal ricevitore a bordo e distinto da quello inviato dal transponder ad altri velivoli che lo stanno interrogando; dal tempo totale trascorso è possibile risalire alla distanza tra velivolo e stazione.

14.5.3 TACAN

Il TACAN (Tactical Air Navigation, banda UHF tra i 962 e i 1213 MHz) è un apparato di radionavigazione in grado di fornire sia la radiale che la distanza dalla stazione trasmittente.

Il principio di funzionamento del TACAN è simile a quello del VOR/DME, nel senso che l'indicazione della radiale viene fornita dallo sfasamento fra un impulso di riferimento ed un segnale ruotante, anche se questo viene creato in modo differente e può contenere una codifica di informazioni.

La distanza dalla stazione viene fornita su interrogazione da parte del velivolo: questi invia un'interrogazione alla stazione di terra la quale reagisce inviando una risposta; la misura del ritardo fra interrogazione e risposta consentono la misura della distanza.

Per l'identificazione della risposta da parte dell'unica stazione che può essere interrogata da più velivoli occorre che ogni velivolo sia in grado di riconoscere la propria risposta.

La codifica completa inviata contiene informazioni utili per misurare con accuratezza la radiale e vi è spazio per la risposta contemporanea all'interrogazione di distanza da parte di 100 differenti velivoli.

Il sistema può essere usato anche solo in modo passivo, senza cioè trasmissione da parte del velivolo, ma in questo caso si ha solo l'indicazione di radiale.

14.5.4 Sistemi iperbolici

Sono sistemi con grado di copertura molto elevata, basati sull'impiego di coppie di stazioni trasmittenti sincronizzate. Misurando la differenza di tempo di ricezione fra impulsi inviati dalle due stazioni (o di fase fra segnali continui), si ha una differenza di distanza dalle due

stazioni che a loro volta sono distanziate di centinaia di chilometri; in questo modo si definiscono delle linee a pari differenza di distanza che sono quindi delle iperboli. Ogni coppia di stazione permette quindi di identificare la particolare iperbole sulla quale ci si trova e il rilevamento con più coppie di stazioni permette di determinare la posizione.

I radiofari della coppia sono definiti *master* e *slave*. In genere si utilizzano un master e due slave per formare le due coppie di stazioni necessarie a calcolare il punto.

I sistemi di questo tipo trasmettono a frequenze relativamente basse, come necessario per avere una portata alta (superiore a 1500 miglia). I sistemi più utilizzati sono il *Loran C*, l'*Omega* e il *Decca*.

Il *Loran C* (Long Range Aid to Navigation) è basato sull'invio di segnali ad impulsi, e quindi su una misura di differenza di tempo tra gli impulsi provenienti dalla stazione master e quelli provenienti dalla stazione slave. Tuttavia esso si basa sulla misura di una differenza di fase tra segnali continui per raffinare il punto. La frequenza di lavoro è attorno ai 100 kHz. Ad ogni master si possono associare 4 slave, ammesso che siano entro 1000 miglia di distanza dal master. Il master emette in tutte le direzioni un segnale ad impulsi che viene ricevuto da uno o più slave. Lo slave lascia passare un certo ritardo prima di trasmettere a sua volta un treno di impulsi. In questo modo il velivolo ha sicuramente già ricevuto il segnale dal master e quindi, successivamente, riceverà quello dallo slave.

La copertura è molto vasta nell'emisfero settentrionale ma la precisione varia a seconda della distanza dai radiofari: si parla comunque di 200 m come precisione massima, ossia una precisione minore del GPS descritto in seguito, che scende ad 1 miglio quando il velivolo è a 1000 miglia di distanza dalle stazioni.

L'*Omega* è basato sull'invio di segnali continui, e quindi su una misura di differenza di fase tra il segnale proveniente dalla stazione master e quello proveniente dalla stazione slave. Esso funziona a bassissima frequenza (10 - 14 kHz) e permette di avere radiofari distanti tra loro 5000 - 6000 miglia. In tal modo con 8 radiofari si è ottenuta la copertura globale. La precisione è tuttavia di alcune miglia, nettamente minore del GPS, nonostante anche l'*Omega* abbia copertura globale.

Il *Decca* infine è molto simile all'*Omega*: utilizza un sistema master-slave, lavora a bassissima frequenza e misura la differenza di fase tra i segnali master e slave. Diversamente dall'*Omega*, esso ha una copertura modesta poiché ha portata di 300 - 500 miglia e le catene *Decca* non sono molto diffuse sul pianeta; la precisione è un po' più alta, ma sempre attorno al miglio.

14.5.5 GPS e DGPS

Il sistema *GPS* (Global Positioning System) e, soprattutto, il *DGPS* (Differential GPS) sono attualmente i migliori sistemi di radiolocalizzazione, sia per precisione che per copertura. I sistemi iperbolici visti sopra, che hanno ormai diversi decenni di vita, sono tuttora in uso come riserva, ma è probabile la loro disattivazione nel primo decennio del 2000.

Il *GPS*, basato sull'impiego di satelliti artificiali, riesce a fornire, con precisione maggiore di quella di qualsiasi altro sistema attualmente in uso, la posizione nelle tre dimensioni (latitudine, longitudine e quota) la velocità e l'ora. Realizzato e controllato dal Ministero della Difesa degli Stati Uniti, esso vede ormai moltissime applicazioni civili.

L'apparato di bordo è un sistema passivo che riceve segnali inviati da una costellazione di satelliti artificiali e quindi con una tecnica analoga a quella impiegata nei sistemi convenzionali di calcolo della posizione in base alla posizione delle stelle fisse.

Il sistema è composto da tre componenti principali, definiti *segmento spaziale*, *segmento di controllo* e *segmento di impiego*.

Il segmento spaziale è composto da 24 satelliti, posti su 6 diverse orbite inclinate di 55° rispetto all'equatore ed equispaziate di 60° tra di loro, a circa 20000 km di quota, con un periodo di rivoluzione di 12 ore; in ogni orbita si trovano 4 satelliti spazati di 90° . Con tale disposizione in ogni punto della terra ed in qualsiasi istante sono visibili contemporaneamente tra i 5 e gli 8 satelliti.

Ognuno dei satelliti trasmette con continuità informazioni relative alla sua posizione, al tempo, alla identificazione del satellite stesso ed al suo stato di efficienza. La trasmissione, contenente informazioni in formato digitale, avviene su portanti a microonde di due diverse frequenze (1575.42 e 1227.60 MHz); entrambe sono relative al cosiddetto *codice P (Precise)*, mentre una sola di esse è relativa al *codice C/A (Coarse Acquisition)*; i due codici forniscono due diversi servizi: il codice P è legato al servizio *PPS (Precise Positioning Service)* che consente una precisione di misura molto più elevata di quella relativa al servizio *SPS (Standard Positioning Service)* legato al codice C/A; il primo è riservato ad impieghi militari o impieghi civili particolari autorizzati dal Governo americano (per esempio alcune applicazioni di geodesia), il secondo è disponibile per tutti gli impieghi e contiene un segnale intenzionalmente degradato che impedisce di ottenere un'elevata precisione: la precisione potenziale del servizio SPS è di 30 m in orizzontale, ma viene portata a 100 m dalla degradazione delle informazioni trasmesse, con una precisione verticale di 156 m. La precisione raggiunta dal PPS è di 22 m in orizzontale e 27.7 in verticale, costanti nel tempo (si consideri che una buona piattaforma inerziale può dare errori di 800 m dopo un'ora di navigazione). Il sistema è in grado di fornire anche valori di velocità con approssimazioni di 0.1 m/s, basandosi sia sulla derivata della posizione nel tempo che sull'effetto Doppler dei segnali ricevuti.

Il segmento di controllo è costituito da 5 stazioni in diversi punti del globo e da una stazione principale posta a Colorado Spring negli USA. Lo scopo di questo sottosistema è quello di verificare il perfetto funzionamento del segmento spaziale, ricalcolare in continuazione i dati relativi alle effemeridi dei satelliti e di conseguenza aggiornare il messaggio trasmesso. La stazione principale, oltre a coordinare l'attività dell'intero sistema, elabora i dati trasmessi dai satelliti e può correggerne la traiettoria.

Il segmento di impiego è costituito dagli utilizzatori; questi, essendo esclusivamente riceventi, possono essere in qualsiasi numero. I ricevitori possono essere suddivisi in funzione del numero di *canali*, ovvero di satelliti che possono ricevere contemporaneamente. Aumentando il numero di canali, diminuisce il tempo necessario a ricevere ed elaborare i dati inviati dai quattro satelliti indispensabili per eseguire la misura.

I sistemi ridondanti a 12 canali sono ormai diffusi anche per impieghi civili, in apparecchi di dimensioni, pesi e costi estremamente limitati.

Il principio di funzionamento del GPS è basato sulla misura, effettuata nella stazione ricevente, della distanza dai satelliti e dalla conoscenza della loro posizione.

Supponendo di conoscere la posizione dei satelliti (x_i, y_i, z_i) e la loro distanza (D_i) è possibile ricavare la posizione dalla soluzione sistema:

$$D_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad i = 1 \div 3,$$

che equivale a trovare l'intersezione tra 3 sfere (fig. 14.7). In effetti il risultato consiste di due punti generalmente distinti, ma di cui uno è in una posizione inverosimile e quindi viene automaticamente scartato.

Per ricavare la distanza dai satelliti, questi trasmettono un messaggio contenente il tempo di inizio trasmissione. Se la stazione ricevente ha un orologio identico, dalla velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche è possibile ricavare la distanza. A questo fine tutti i satelliti e tutte le apparecchiature di terra generano un messaggio in codice identico nello stesso istante; dal confronto dei codici è possibile ricavare il tempo e quindi calcolare la distanza. Questa operazione è affetta da errori legati al sincronismo dell'orologio e all'ipotesi di costanza di velocità di propagazione.

Il sincronismo degli orologi dei satelliti è assicurato dalla loro grande precisione, essendo orologi atomici, e dal fatto che da terra possono essere corretti; negli apparecchi a terra non è possibile utilizzare orologi di precisione paragonabile e quindi, per quanto questi siano precisi, la misura del tempo sarà affetta da un certo errore.

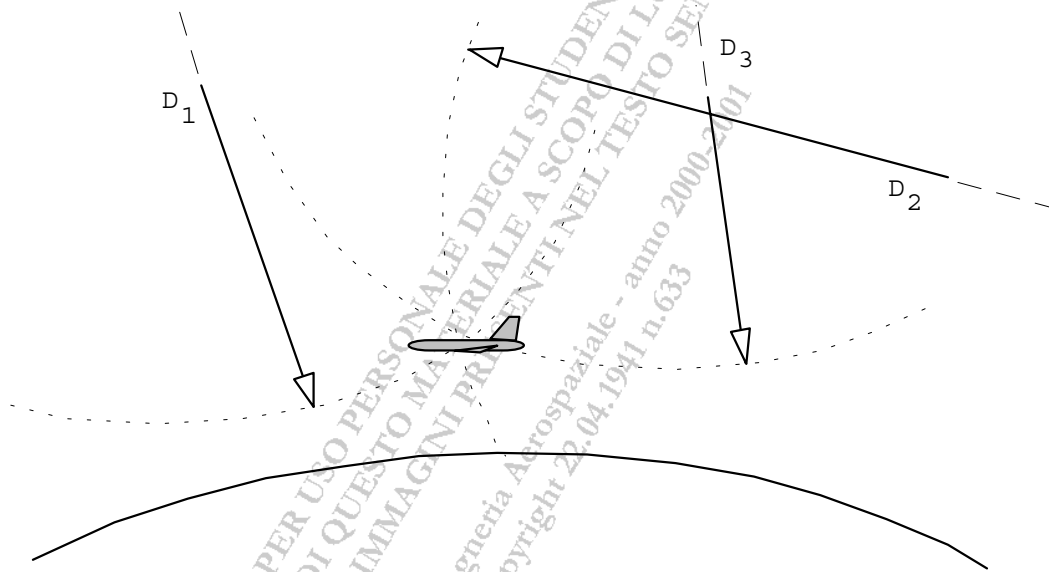


Fig. 14.7 - Posizionamento tramite GPS

La distanza dal satellite può allora essere calcolata con l'espressione:

$$D = c \cdot (\Delta t + \Delta t_{err})$$

dove Δt è quello misurato con l'orologio e Δt_{err} è l'errore di sincronismo; a questo punto, se anziché tre satelliti se ne ricevono quattro, è possibile aggiungere un'equazione e determinare anche l'errore di sincronismo.

Per quanto riguarda la distanza, altre cause di errore sono dovute al fatto che la velocità di propagazione è alterata dall'atmosfera e che la stessa può provocare degli effetti di rifrazione che portano ad una sovrastima della distanza; questi ultimi effetti sono comunque molto piccoli e portano ad errori dell'ordine dei metri.

La posizione del satellite al momento della trasmissione è ricavabile dal calcolatore della stazione ricevente utilizzando le effemeridi che vengono trasmesse dal satellite stesso; anche in questo calcolo per quanto le effemeridi siano precise può essere introdotto un piccolo errore.

Negli ultimi anni un sistema differenziale sta entrando in uso per ridurre l'errore del GPS, anche se si utilizza il codice SPS. Il sistema, definito *DGPS*, si basa, oltre che sulla costellazione di satelliti, su una stazione a terra, di coordinate note e dotata di ricevente GPS. Questa stazione è dunque in grado di calcolare l'errore di posizionamento legato al GPS. Si suppone che nel raggio di circa 200 km dalla stazione vengano visti gli stessi satelliti e quindi l'errore

commesso da un ricevitore GPS è lo stesso della stazione; se viene ricevuto anche questo dato, il calcolo della posizione si raffina a livelli superiori di quelli legati al codice PPS, portando l'errore di posizionamento tra 1 e 10 m. Alcuni Paesi, come l'Inghilterra ed alcune zone degli Stati Uniti, hanno già realizzato un copertura del territorio con stazioni GPS differenziali, che trasmettono continuamente l'errore locale.

14.5.6 ILS

Il sistema di guida all'atterraggio *ILS* (Instrument Landing System, parte in VHF e parte in UHF) è un sistema in grado di guidare il pilota nella fase di avvicinamento alla pista.

La stazione di terra emette dei segnali radio che individuano due piani separati, *glideslope* e *localiser*; il glideslope, trasmesso in UHF attorno ai 330 MHz, è un piano inclinato generalmente tra i 3 e i 6 gradi sull'orizzontale (dipende dalle condizioni geografiche attorno all'aeroporto), che interseca la pista a 2-300 m dal suo inizio; il localiser, trasmesso in VHF attorno ai 110 MHz, è un piano verticale coincidente con l'asse di simmetria della pista. L'intersezione di questi due piani costituisce un *sentiero di discesa* ideale per l'atterraggio, come mostrato in fig. 14.8.

Ognuno dei piani viene individuato grazie ad una coppia di segnali radio costituiti da una portante modulata con due diverse frequenze, una di 90Hz ed una di 150Hz, che le antenne irradiano secondo un angolo molto stretto attorno a sentiero di discesa. Nel glideslope la nota di frequenza 150Hz è più forte al di sotto del piano di discesa e quella di 90Hz al di sopra, mentre nel localiser la nota di frequenza 90Hz è più forte a sinistra del piano e quella di 150Hz a destra. L'apparecchiatura di bordo è in grado di distinguere l'intensità dei segnali a 90 e a 150Hz e quindi di fornire un'indicazione dello scostamento dal sentiero ideale di discesa. L'indicatore è costituito da due lancette, una verticale ed una orizzontale che indicano lo scostamento misurato. E' lo stesso utilizzato per il VOR.

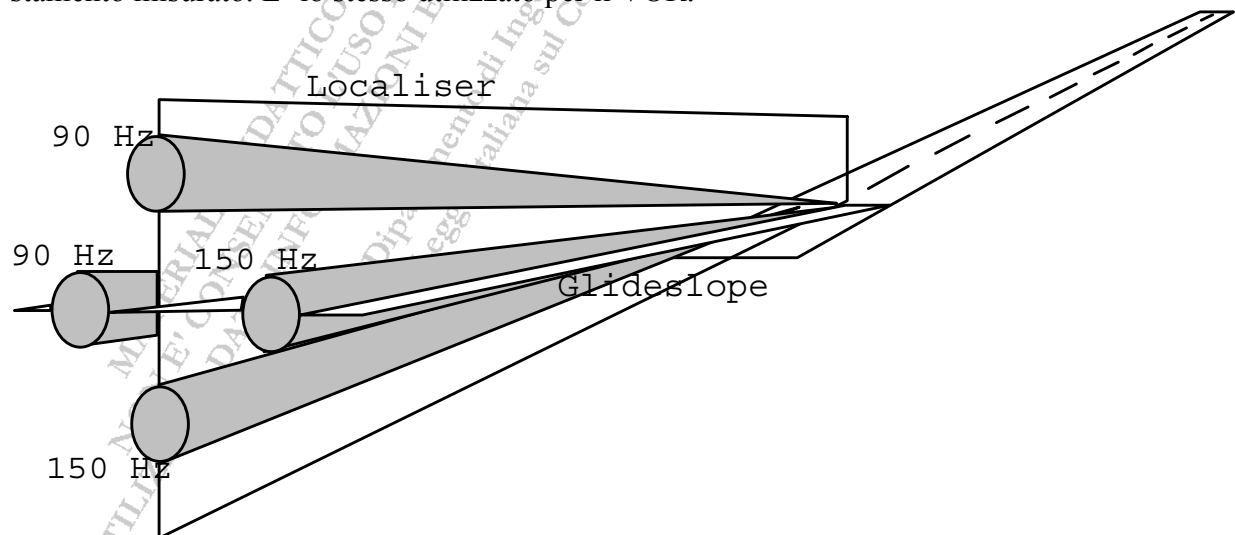


Fig. 14.8 - ILS, glideslope e localiser

Lungo il prolungamento dell'asse pista, ossia lungo il piano del localiser, si trovano 2 o 3 *marker beacons*, ovvero radiofari verticali in VHF a 75 MHz, che avvisano il pilota dello stato di avvicinamento. Il più lontano, detto *outer marker*, si trova tra le 3 e le 6 miglia dalla testata pista. Quando il velivolo passa sopra di esso, viene emesso un segnale acustico in cabina di

pilotaggio e si accende una spia blu. Il successivo radiofaro incontrato dal velivolo è il *middle marker*, in genere tra 0.5 e 0.8 miglia dalla testata pista, che attiva un altro segnale acustico ed una spia ambra. Infine l'*inner marker*, tra i 250 e i 1250 piedi dalla testata pista, attiva un ultimo segnale acustico ed una spia bianca.

I vari sistemi ILS installati hanno diversi gradi di accuratezza, indicati con delle *categorie* che si riferiscono all'altezza e visibilità minime operative:

- I: altezza 200 piedi, visibilità 800 m;
- II: altezza tra 100 e 200 piedi, visibilità tra 400 e 800 m;
- IIIa: altezza 0, visibilità 200 m;
- IIIb: altezza 0, visibilità 50 m;
- IIIc: altezza 0, visibilità 0.

Il sistema ha alcune limitazioni che consistono nella difficoltà di un corretto allineamento del fascio di antenna che risente della morfologia del terreno e di diversi disturbi; inoltre il fascio è molto stretto per cui può essere utilizzato solo per identificare il sentiero tracciato, ma diventa inutilizzabile per sentieri di discesa più ripidi o per avvicinamenti brevi o curvilinei.

14.5.7 MLS

Il sistema *MLS* (Microwave Landing System) supera gli inconvenienti dell'ILS, tant'è vero che probabilmente è destinato a sostituirlo. Il suo grande vantaggio è la possibilità data al velivolo di avvicinarsi alla pista con traiettorie differenti, condizioni specialmente sfruttate da elicotteri e velivoli militari. Inoltre fornisce un'indicazione di distanza precisa dal punto di atterraggio.

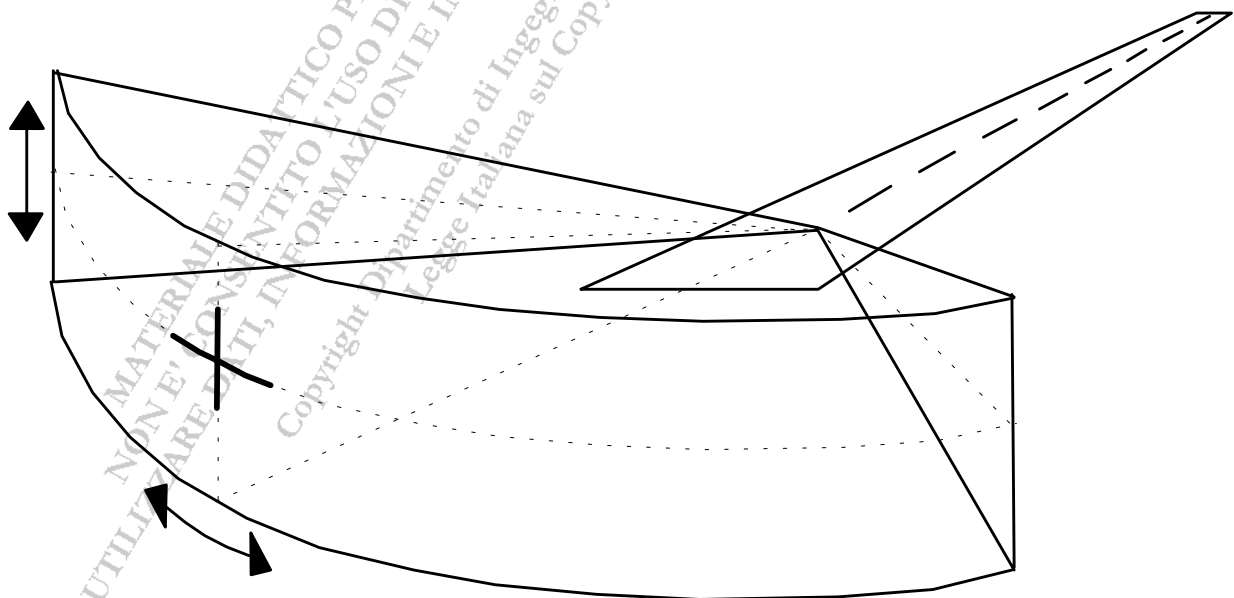


Fig. 14.9 - MLS

Il sistema è formato dall'insieme di tre sottosistemi: uno per la misura di azimut (AZ), uno per l'elevazione (EL) ed uno per la distanza (P-DME, Precision DME).

Il sottosistema azimutale fornisce informazioni analoghe a quelle dell'ILS, ma su un angolo di apertura di 124 gradi attorno all'asse della pista. Il sottosistema in elevazione copre un campo

di 30 gradi. Il sottosistema per la distanza ha una portata di 20 miglia. La precisione delle indicazioni di azimut e di elevazione sono dell'ordine di 0.015 gradi, per la distanza di 30 metri. Il metodo utilizzato per definire le posizioni angolari, sia in azimut che elevazione, sono basate su una scansione in andata immediatamente seguita da una di ritorno, come mostrato in fig. 14.9; dalla misura del tempo fra il primo ed il secondo passaggio è immediato risalire alla misura dell'angolo.

14.5.8 Radioaltimetro

Il radioaltimetro fornisce l'altezza del velivolo dal suolo mediante una misura di differenza di fase; il principio di funzionamento è basato, come nel radar, nella riflessione delle onde radio, ma in questo caso la trasmissione anziché essere impulsiva è continua.

La trasmittente emette una portante di frequenza variabile fra due frequenze prefissate (ad es. fra 420 e 460 MHz), modulandola con un segnale a 120 Hz. Il ricevitore raccoglie, attraverso un'antenna diversa da quella trasmittente, sia i segnali trasmessi che quelli riflessi dal terreno; questi segnali, per il motivo appena visto, non saranno alla stessa frequenza: dal confronto è possibile risalire al tempo percorso dal segnale per andare e tornare al velivolo e quindi si può valutare la sua distanza dal terreno.

Il radioaltimetro può funzionare correttamente fino a quote dell'ordine di 4000ft e può avere diverse scale per aumentarne la sensibilità a bassa quota, dove la precisione è dell'ordine di 1 ft.

14.5.9 Navigazione Doppler

Il navigatore Doppler è un sistema autonomo, come le piattaforme inerziali, che ricava la posizione da una misura della velocità ottenuta mediante un radar Doppler.

Rispetto alla piattaforma inerziale si ha il vantaggio di una misura diretta della velocità, e quindi più precisa ed esente da accumulo di errori; non è richiesto un allineamento iniziale, ma d'altra parte il sistema sfrutta emissioni elettromagnetiche ed è quindi disturbabile.

Il principio di funzionamento è legato all'effetto Doppler, cioè ad un cambiamento della frequenza dovuto alla velocità relativa tra trasmettitore e ricevitore; la variazione di frequenza è proporzionale alla velocità relativa ed inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda; conoscendo quindi la lunghezza d'onda (ossia la frequenza reale del segnale) e misurando lo spostamento in frequenza si può ricavare la velocità relativa.

Il radar Doppler emette verso terra 3 o 4 fasci molto stretti, sulla frequenza attorno ai 10000 MHz, inclinato di un angolo noto; il terreno presenta sempre delle irregolarità sufficienti a creare una riflessione del segnale verso la zona d'origine, e quindi si osserva un'eco del segnale emesso con uno spostamento in frequenza dovuto alla velocità del velivolo.

Per essere impiegato in un sistema di navigazione occorre conoscere l'orientamento dei fasci e quindi del velivolo: questo viene ottenuto dal sistema giroscopico, e sono necessari tre diversi radar Doppler per avere le tre componenti di velocità.

I problemi più grossi legati all'impiego di questo sistema sono legati alle variazioni di capacità di riflessione legate ai diversi tipi di terreno, al crescere dell'attenuazione del segnale con la quota, al disturbo arrecato dalle gocce d'acqua nell'aria ed al fatto che per particolari assetti del velivolo (angoli di rollio o beccheggio levato) il punto di intersezione del fascio col terre-

no può allontanarsi molto o non esistere. Inoltre il segnale radio emesso può essere rilevato da stazioni a terra, e questo costituisce un limite d'applicazione in campo militare.

14.5.10 Navigazione inerziale

La *navigazione inerziale* è una tecnica adatta a stimare velocità, posizione, assetto e rotta di un veicolo in movimento tramite l'integrazione di misure di accelerazioni. Essa è in grado di fornire informazioni di guida all'autopilota e ad altri sistemi di bordo.

Il sistema è in linea di principio indipendente da qualsiasi aiuto da terra ed autosufficiente, e quindi non è disturbabile in quanto non impiega nessun mezzo di trasmissione elettromagnetico. D'altra parte ha lo svantaggio di accumulare gli errori in funzione del tempo di volo.

Un *navigatore inerziale*, o *piattaforma inerziale*, deve essere dotato di accelerometri per la misura di accelerazioni lineari, di integratori e di un calcolatore che gestisca il sistema.

Per l'impiego della piattaforma è necessario stabilire le condizioni iniziali e quindi la posizione iniziale ed un allineamento iniziale molto accurato della direzione.

In una piattaforma convenzionale sono necessari 2 accelerometri, uno nella direzione nord-sud e l'altro nella direzione est-ovest. Essi quindi non possono essere montati solidali col velivolo, ma attraverso strutture cardaniche stabilizzate da giroscopi, che costantemente correggono l'orientamento orizzontale in base al flusso di campo magnetico terrestre e l'orientamento verticale in base all'accelerazione di gravità.

Attualmente la tecnologia è cambiata e la struttura è solidale col velivolo. Essa porta 3 giroscopi, che però sono ad 1 grado di libertà, ossia solo quello di spin; gli assi sono paralleli agli assi corpo del velivolo e, durante una rotazione attorno ad uno di essi, viene fornita indicazione della velocità angolare. Analogamente verranno utilizzati 3 accelerometri, sensibili lungo i 3 assi corpo del velivolo.

I segnali di questo tipo di piattaforma sono elaborati da un microprocessore che risolve le equazioni della cinematica nel sistema di riferimento terrestre, ossia calcolando le componenti di moto sul piano orizzontale e quello verticale locale, affinché i risultati possano essere utilizzati a bordo.

Bibliografia

S.E.T. Taylor, H.A.Parmar, R.Underdown, *Ground Studies for Pilots - Vol I - Radio Aids*, BSP Professional Books, 1988.

Autori vari, *Avionic Systems*, ed D.H.Middleton, Longman Scientific and Technical, 1989.