

## Navigazione radiogoniometrica

### 6.1 Generalità

La radiogoniometria si può definire come quel settore della radionavigazione che si propone di determinare la direzione di propagazione delle onde elettromagnetiche ricorrendo a un appropriato strumento che è il *radiogoniometro*.

Con il radiogoniometro, sfruttando una notevole proprietà che hanno alcune antenne, si può misurare l'angolo compreso tra una direzione orientata di riferimento (direzione che a bordo è quella dell'asse longitudinale dell'aeromobile, mentre a terra è quella della linea meridiana) e il piano passante per le verticali del radiogoniometro e della stazione radio emittente. Tale angolo è chiamato *rilevamento radiogoniometrico*.

Il radiogoniometro può essere situato a terra o a bordo dell'aeromobile.

Nel primo caso una o più stazioni radiogoniometriche al suolo, delle quali sono note le posizioni, determinano la direzione e il senso dei segnali radio provenienti dall'aeromobile in volo e comunicano al pilota i rilevamenti effettuati o, addirittura, la sua posizione. A bordo basta disporre di una semplice stazione radio trasmittente e ricevente in quanto l'equipaggiamento principale si trova nelle stazioni al suolo. L'operazione è però alquanto laboriosa e richiede un certo tempo che male si concilia con le velocità dell'aeromobile.

Nel secondo caso, ossia con radiogoniometro a bordo, il rilevamento di stazioni radiotrasmettenti al suolo per calcolare la posizione dell'aeromobile viene determinato direttamente da bordo. La stazione a terra può essere una semplice stazione trasmittente o un radiofaro non direzionale *NDB (Nondirectional Beacon)*. Le misure da bordo non sono sufficientemente accurate in quanto non è possibile disporre di antenne di adeguate dimensioni; tuttavia è possibile dirigere verso un *NDB* o allontanarsi da esso, anche se non su traiettorie rettilinee.

### 6.2 Principio del radiogoniometro

Il radiogoniometro si basa sulla proprietà direttiva delle antenne a telaio; queste antenne sono dei circuiti chiusi a forma di bobine con dimensioni abbastanza grandi ma sempre assai modeste rispetto alle lunghezze d'onda impiegate.

Il telaio, per semplicità, può essere considerato rettangolare, disposto in un piano verticale e girevole intorno a un asse di simmetria verticale (fig. 6.1).

Quando il telaio è investito da un'onda elettromagnetica il cui campo  $E$  è verticale (polarizzazione verticale), gli elementi verticali del telaio diventano sede di forze elettromotrici indotte (f.e.m.)  $v_1$  e  $v_2$ . Se la direzione di provenienza dell'onda è normale al piano del telaio ( $\theta = 90^\circ$ ), le due forze elettromotrici hanno uguale ampiezza e uguale fase e, pertanto, la loro differenza è nulla.

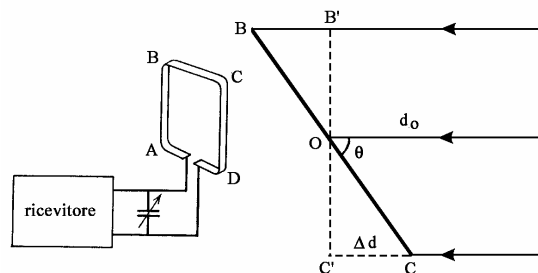
Se, invece, la direzione di provenienza forma un angolo  $\theta$  diverso da  $90^\circ$ , le due forze elettromotrici, supposte ancora di uguale ampiezza, sono tra loro sfasate e la loro differenza non è più nulla; tale differenza è massima quando la direzione di propagazione è parallela al piano del telaio, cioè quando  $\theta = 0^\circ$ .

Per ricavare la forza elettromotrice indotta in un telaio, in funzione dell'angolo  $\theta$ , si consideri il telaio rappresentato nella figura dai punti  $B$  e  $C$  (intersezioni dei due rami verticali con il piano orizzontale della figura).

Nel punto centrale  $O$ , se  $E$  è l'ampiezza del campo elettrico, l'ampiezza  $V_0$  della f.e.m. indotta  $v_0$  è  $V_0 = hE$  (essendo  $h$  un coefficiente di proporzionalità).

Pertanto tale f.e.m. si esprime attraverso la relazione:

$$v_0 = hE \sin \omega t$$



**Figura 6.1** – Principio del radiogoniometro

Le f.e.m. indotte nei lati  $AB$  e  $CD$  del telaio sono sfasate rispetto a  $v_0$  dello stesso angolo  $\varphi$ , rispettivamente in ritardo e in anticipo. Lo sfasamento è dovuto alla differenza di tempo necessaria all'onda per giungere in  $B$  e in  $C$ ; infatti, se  $d_0$  è la distanza tra il trasmettitore  $T$  e il punto  $O$ , le distanze da  $T$  a  $B$  e da  $T$  a  $C$  sono uguali a:

$$d_B = d_0 + \Delta d; \quad d_C = d_0 - \Delta d$$

dove  $\Delta d = l \cos \theta / 2$ , essendo  $l$  la distanza tra  $B$  e  $C$  (dimensione dell'antenna).

Lo sfasamento  $\varphi$  può essere ricavato dalla proporzione:

$$\lambda : 2\pi = \Delta d : \varphi$$

in quanto per una differenza di distanza uguale alla lunghezza d'onda  $\lambda$  si avrebbe uno sfasamento  $2\pi$  :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{l \cos \theta}{2} = \frac{\pi}{\lambda} l \cos \theta$$

Si ha, pertanto:

$$v_B = hE \text{sen}(\omega t + \varphi); \quad v_C = hE \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

la f.e.m. indotta nel telaio è, pertanto:

$$v = v_B - v_C = hE [\text{sen}(\omega t + \varphi) - \text{sen}(\omega t - \varphi)]$$

da cui, applicando la nota formula di prostaferesi:

$$\text{sen } \alpha - \text{sen } \beta = 2 \text{sen} \frac{\alpha - \beta}{2} \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$$

si ricava:

$$v = 2hE \cos \omega t \text{sen } \varphi = 2hE \text{sen} \left( \frac{\pi l \cos \theta}{\lambda} \right) \cos \omega t$$

In pratica, essendo  $l / \lambda \ll 1$  (dimensione delle antenne molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda), si ha:

$$\text{sen} \left( \frac{\pi}{\lambda} l \cos \theta \right) \cong \frac{\pi}{\lambda} l \cos \theta$$

e, pertanto:

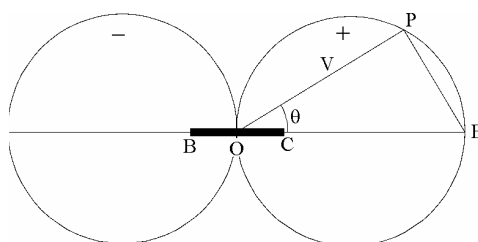
$$v = \frac{2\pi A}{\lambda} E \cos \theta \text{sen}(\omega t + \pi / 2) \quad (6.1)$$

essendo  $A = lh$  l'area efficace del telaio.

Si osservi dalla (6.1) che  $v$  è sfasata di  $90^\circ$  rispetto alla f.e.m. indotta nel conduttore passante per  $O$ , mentre la sua ampiezza è funzione di  $\theta$ : massima quando  $\theta = 0^\circ$  o  $180^\circ$ , nulla quando  $\theta = \pm 90^\circ$ . Nella figura 6.2 è riportato il diagramma di ricezione nel piano orizzontale che è una *curva a otto*. Infatti, se il diametro di una circonferenza è posto uguale a  $2\pi AE / \lambda$ ,  $OP$ , per la (6.1), rappresenta l'intensità del segnale in ricezione per un generico angolo  $\theta$ . Il segno (+) o (-) assegnato a ciascuna delle due circonferenze dipende dal segno del coseno.

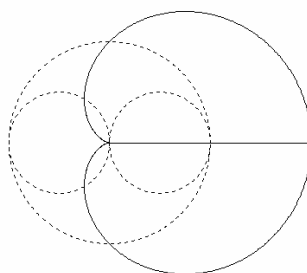
Dal diagramma della figura 6.2 si osserva che intorno ai punti di massima ricezione la variazione di intensità del segnale è minima mentre si hanno rapide variazioni del segnale intorno ai punti di ricezione nulla. Per tale motivo la direzione di provenienza delle radioonde viene stabilita in base al punto di ricezione del segnale nullo, cioè disponendo il telaio perpendicolarmente alla direzione di provenienza delle radioonde.

Si osserva ancora che, procedendo in tal modo, è possibile stabilire la direzione di provenienza delle radioonde ma non il verso ed è quindi necessario eliminare l'ambiguità di  $180^\circ$ .



**Figura 6.2** – Diagramma di ricezione dell'antenna a telaio

A tale fine si aggiunge all'antenna a telaio un'antenna verticale, accoppiata induttivamente alla prima e posta nel punto  $O$ ; il diagramma di ricezione di tale antenna è una circonferenza il cui raggio viene posto uguale a  $OE$ . Il diagramma risultante, ottenuto dalla somma della curva a otto e della circonferenza, è una curva denominata *cardioide* (fig. 6.3).



**Figura 6.3** – Diagramma di ricezione di un radiogoniometro

La f.e.m. risultante avrà, al variare dell'orientamento del telaio, un solo massimo di ampiezza doppia rispetto al massimo della curva a otto, e un solo minimo in direzione opposta al massimo.

Poiché, come appare dalla (6.1), la f.e.m. indotta nel telaio è sfasata di  $90^\circ$  rispetto a quella che nasce nell'antenna verticale, occorre sfasare quest'ultima di  $90^\circ$  affinché sia in fase con la f.e.m. del telaio mediante l'accoppiamento induttivo.

In pratica per determinare la direzione e il senso di provenienza delle radioonde si procede in tal modo: si sintonizza il ricevitore con la sola antenna verticale, si esclude poi tale antenna includendo l'antenna a telaio. Ruotando il telaio attorno ad un asse verticale si individua la direzione di propagazione dell'onda basandosi sul minimo di ricezione che avviene quando l'antenna a telaio è esat-

tamente perpendicolare alla direzione di propagazione del segnale. Il sistema presenta però l'inconveniente di non fornire il verso, ossia vi è un'ambiguità di 180°. Si passa alla determinazione di tale verso inserendo l'antenna verticale e ruotando il sistema a telaio di 90°. Il diagramma risultante (*cardioide*) avrà ora un solo minimo che individua tale verso.

L'applicazione di questo principio non è priva di difficoltà in quanto non sempre le f.e.m. indotte nelle due antenne producono un diagramma di ricezione come nella figura 6.3; di conseguenza la ricerca del minimo non è sempre agevole.

Per evitare la rotazione del telaio è possibile ricorrere ai radiogoniometri a telai incrociati fissi, noti anche come *telai Bellini-Tosi* dal nome degli italiani che nel 1907 li realizzarono.

Essi comprendono due grandi telai fissi e incrociati disposti in piani verticali tra loro perpendicolari (per esempio un telaio disposto per N-S, il secondo per E-W negli impianti al suolo, oppure un telaio disposto longitudinalmente, l'altro trasversalmente nei radiogoniometri di bordo). I due telai sono collegati ad una coppia di bobine fisse, ortogonali tra loro e avvolte intorno a un cilindro al cui interno ruota una bobina di ricerca (fig. 6.4).

Le bobine collegate ai due telai hanno la funzione di riprodurre all'interno del cilindro il campo incidente rispetto ai telai fissi cosicché la bobina di ricerca funziona come un telaio girevole sebbene in un ambiente più limitato.

Infatti, le linee di forza del campo magnetico che si propagano nello spazio da una stazione trasmittente, quando incontrano il telaio originano in esso una f.e.m. di alta frequenza dando luogo ad una corrente la cui intensità varia col coseno dell'angolo che il piano del telaio forma con la direzione di provenienza delle radioonde.

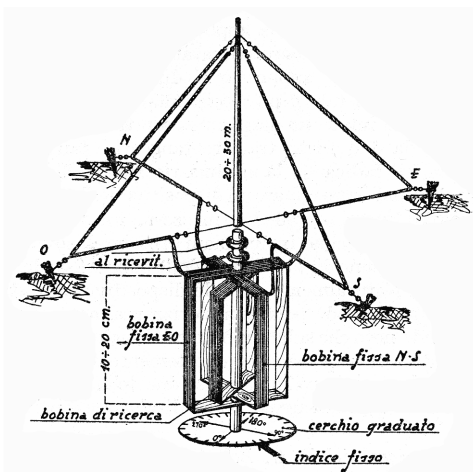


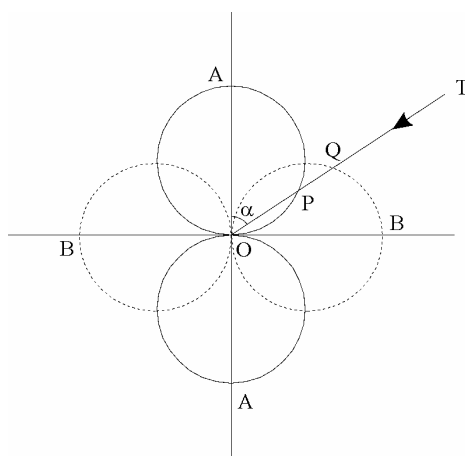
Figura 6.4 – Prima realizzazione di un telaio Bellini-Tosi

Nel caso di telai ortogonali (fig. 6.5), se  $\alpha$  è l'angolo che il telaio  $A$  forma con la direzione di provenienza dei segnali, la corrente che circola nel telaio ha intensità:

$$OP = I_0 \cos \alpha$$

mentre quella che circola nel telaio  $B$  è uguale a:

$$OQ = I_0 \cos(90^\circ - \alpha) = I_0 \sin \alpha$$



**Figura 6.5** – Principio del telaio Bellini-Tosi

Ciascuna di queste correnti circola anche nelle bobine dando luogo, di conseguenza, a campi magnetici oscillanti perpendicolari ad esse e proporzionali alle correnti stesse la cui risultante è sempre normale alla direzione di provenienza dei segnali qualunque sia la posizione di quest'ultima rispetto ai due telai.

La bobina di ricerca, trovandosi in presenza del campo magnetico oscillante, diventa essa stessa sede di corrente indotta il cui valore è nullo quando il piano della bobina è perpendicolare alla direzione della stazione.

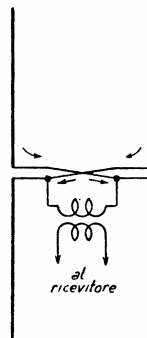
Per eliminare l'ambiguità di  $180^\circ$ , alla bobina si accoppia induttivamente un'antenna verticale che, inserita, rafforza il segnale o lo lascia ancora nullo.

Non sempre l'onda in arrivo è perfettamente polarizzata verticalmente; di conseguenza vi sarà anche una componente orizzontale del campo elettrico e, pertanto, i rami orizzontali dell'antenna a telaio diventano sede di f.e.m. indotta nello stesso modo dei due rami verticali con conseguente difficoltà nell'ottenimento dell'orientamento dei segnali.

Normalmente la rotazione del piano di polarizzazione è dovuta soprattutto alle onde spaziali (*Sky Waves*) che incidono sul telaio. Tale effetto si ha per le on-

de medie specialmente nelle ore notturne durante le quali è più efficiente la propagazione ionosferica (*effetto notte*).

L'errore dovuto alla componente orizzontale del vettore elettrico può essere eliminato sostituendo al telaio un sistema di antenne Adcock che si può immaginare come un telaio a cui siano stati eliminati i rami orizzontali (fig. 6.6).



**Figura 6.6** – Antenna Adcock

Tale antenna, per ciò che concerne la componente verticale, si comporta come una comune antenna a telaio; per quanto riguarda la componente orizzontale il suo effetto è nullo in quanto i due conduttori orizzontali sono molto vicini tra loro e le f.e.m. indotte in essi sono sempre uguali e in fase per cui il loro effetto complessivo è nullo.

L'antenna Adcock ha però dimensioni molto maggiori di un'antenna a telaio e non si presta all'impiego a bordo; viene, pertanto, utilizzata negli impianti a terra (fig. 6.7).

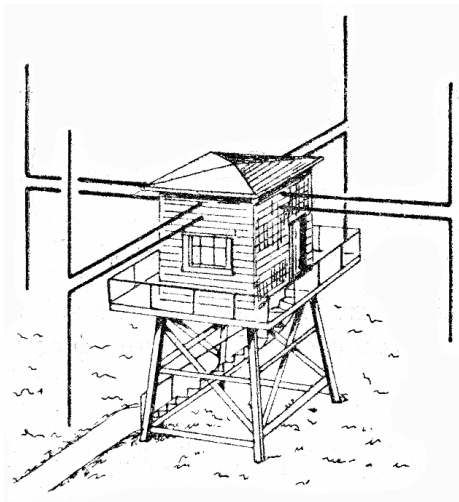


Figura 6.7 – Antenna Adcock nei primi impianti a terra

### 6.3 Radiogoniometria di terra

Nella radiogoniometria di terra una o più stazioni al suolo determinano la direzione di provenienza di segnali radio emessi da un aeromobile. Una sola stazione può soltanto misurare un rilevamento mentre due o più stazioni, che lavorano in gruppo, sotto la direzione di una stazione principale, possono misurare più di un rilevamento e determinare la posizione dell'aeromobile.

Le stazioni a terra, note come stazioni *DF* (*Direction Finding Stations*), operano nella banda *VHF* (tra 118 e 136 MHz) e nella banda *UHF* (tra 200 e 300 MHz); le bande *MF* e *HF* sono ormai in disuso.

Con l'introduzione di radioassistenze più sofisticate e precise (quali, per esempio, il *VOR*), la necessità di disporre di stazioni radiogoniometriche al suolo è venuta meno e il servizio, in taluni casi, è assicurato soltanto nei casi di necessità sulle frequenze di emergenza 121.5 e 243 MHz.

Una sola stazione radiogoniometrica può fornire, a richiesta, i seguenti parametri identificati dalle voci del *codice Q* costituito da tre lettere la prima delle quali è sempre la *Q*. A seconda del rilevamento che si desidera, le voci sono:

- *QDM*; il valore fornito è il rilevamento magnetico della stazione radiogoniometrica rispetto all'aeromobile. Esso, essendo la bussola compensata, rappresenta la rotta magnetica (*MC*) di avvicinamento alla stazione, uguale anche alla prora magnetica (*MH*) che l'aeromobile avrebbe qualora, in assenza di vento, puntasse o si dirigesse verso la stazione radiogoniometrica.
- *QDR*; viene fornito il rilevamento magnetico dell'aeromobile rispetto alla stazione. Qualora tale angolo si inserisce alla bussola, supposta perfettamente compensata, l'aeromobile, in assenza di vento, si allontanerà dalla stazione con rotta magnetica uguale all'angolo dato.

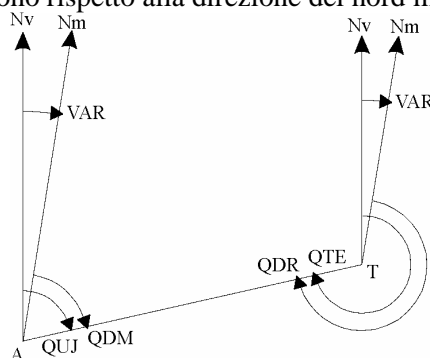


- *QTE*; il valore trasmesso è il rilevamento vero dell'aeromobile rispetto alla stazione; esso, generalmente, viene utilizzato dall'aeromobile per il tracciamento della linea di posizione sulla carta di navigazione.
- *QUJ*; l'angolo fornito è il rilevamento vero della stazione radiogoniometrica rispetto all'aeromobile. Detto angolo è il *QDM* al quale si somma algebricamente il valore della declinazione magnetica (*VAR*) e rappresenta, in assenza di vento, la rotta vera di avvicinamento alla stazione.

Gli angoli ora citati sono, per maggiore chiarezza, rappresentati nella figura 6.8, dove *T* è la posizione della stazione radiogoniometrica terrestre e *A* quella dell'aeromobile.

Poiché la richiesta di tali rilevamenti da parte del pilota avviene quasi sempre in prossimità delle stazioni, le due linee meridiane vere e magnetiche, passanti per *T* e *A*, si possono considerare parallele anche se, in realtà, esse formano tra loro un angolo uguale alla convergenza dei meridiani dato dalla differenza di longitudine per il seno della latitudine media.

Si noti che il *QUJ* e il *QTE* sono, rispetto alla direzione del nord vero  $N_v$ , ciò che il *QDM* e il *QDR* sono rispetto alla direzione del nord magnetico  $N_m$ .



**Figura 6.8** – Voci del codice Q

Per passare ai secondi valori basta sottrarre algebricamente dai primi la declinazione magnetica *VAR*.

Il *QTE* e il *QDR* differiscono di  $180^\circ$  rispettivamente dal *QUJ* e dal *QDM*. Pertanto, noti uno qualunque dei quattro valori e la declinazione magnetica, è possibile determinare gli altri tre.

Nel caso in cui vi siano più stazioni radiogoniometriche che lavorano in gruppo, su richiesta del pilota, i rilevamenti presi da ciascuna stazione vengono, in tempo reale, inviati ad una stazione di controllo che può determinare la posizione dell'aeromobile. Detta stazione fornisce all'aeromobile una delle seguenti informazioni:

- la posizione dell'aeromobile in relazione a un punto di riferimento o attraverso la latitudine e la longitudine (per tale richiesta si utilizza la voce *QTF*);

- il rilevamento vero dell'aeromobile rispetto ad una stazione radiogoniometrica (*QTE*) e la distanza da tale stazione (*QGE*);
- la prora magnetica necessaria per dirigere sulla stazione (*QDM*) e la distanza da essa (*QGE*).

Per tali richieste il pilota chiama la stazione radiogoniometrica sulla frequenza di ascolto specificando il tipo di servizio richiesto in chiaro o mediante l'appropriata voce del codice *Q*. La stazione, a sua volta, richiede la trasmissione di un segnale radio consistente nel nominativo dell'aeromobile, seguito da un segnale continuo di durata uguale a 10 secondi ripetuto due volte, e ancora dal nominativo. Nel caso in cui la stazione non riesce ad effettuare le misure necessarie, può invitare il pilota a ripetere il messaggio.

La stazione radiogoniometrica, dopo aver effettuato le misure, trasmetterà il nominativo dell'aeromobile, seguito dal proprio nominativo, la voce del codice *Q* richiesta, la misura effettuata, il grado di precisione della misura e l'istante di osservazione. Il pilota ripeterà il messaggio per conferma.

Il pilota può anche richiedere alla stazione a terra una serie continua di rilevamenti o di prore (*vettoramento*) mediante la voce *QDL* seguita dalla appropriata voce del codice *Q*.

In funzione della precisione delle osservazioni, i rilevamenti e le posizioni si classificano così come specificato nella seguente tabella 6.1.

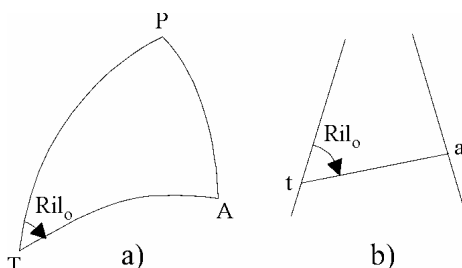
**Tabella 6.1** – Grado di precisione delle misure radiogoniometriche

Classe di precisione	Incertezza nel rilevamento	Incertezza nella posizione
Classe A	$\pm 2^\circ$	entro 5 NM
Classe B	$\pm 5^\circ$	entro 20 NM
Classe C	$\pm 10^\circ$	entro 50 NM
Classe D	più di $10^\circ$	più di 50 NM

Il rilevamento dell'aeromobile preso dalla stazione radiogoniometrica a terra determina un luogo di posizione (*LOP = Line Of Position*) rappresentato dall'arco di circonferenza massima che esce dalla stazione e che forma col meridiano l'angolo misurato *Ril<sub>o</sub>* (fig. 6.9a). Infatti un punto qualsiasi di tale circonferenza massima verrebbe rilevato dalla stazione sempre sotto lo stesso angolo.

I rilevamenti possono essere tracciati sulla carta aeronautica per regolare la condotta della navigazione o per determinare la posizione dell'aeromobile; essi possono anche essere combinati con qualunque altro luogo di posizione.

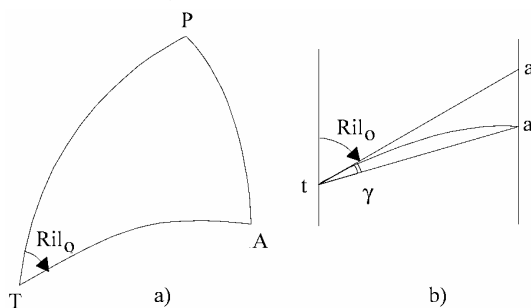
Quando il tracciamento viene effettuato su una carta di Lambert è sufficiente far uscire dalla stazione *t* una semiretta che forma l'angolo *Ril<sub>o</sub>* col meridiano. La semiretta ottenuta (*semiretta di rilevamento*) è con grande approssimazione l'ortodromia che passa per l'aeromobile *a* e, pertanto, rappresenta bene il luogo di posizione (fig. 6.9b).



**Figura 6.9** – Tracciamento della semiretta di rilevamento sulla carta di Lambert

Se il tracciamento del luogo di posizione viene effettuato sulla carta di Mercatore, l'arco di circonferenza massima è rappresentato da una curva che rivolge la sua concavità verso l'equatore. Ne consegue che, per l'isogonismo della carta, se si traccia da  $t$  la semiretta che forma l'angolo  $Ril_o$  col meridiano, essa risulterà tangente all'ortodromia e non passerà per il punto  $a$  (fig. 6.10).

Per piccole distanze (fino a 100 NM), la tangente  $ta'$  si può ritenere coincidente con l'arco  $ta$  e quindi la semiretta di rilevamento è ottenuta costruendo da  $t$  (di posizione nota) l'angolo  $Ril_o$ . Per distanze maggiori, o per latitudini elevate, si preferisce (perché più prossima all'arco di ortodromia e perché contenente la posizione incognita di  $A$ ) costruire la corda  $ta$  che forma col meridiano un angolo  $Ril_l$  (rilevamento lossodromico).



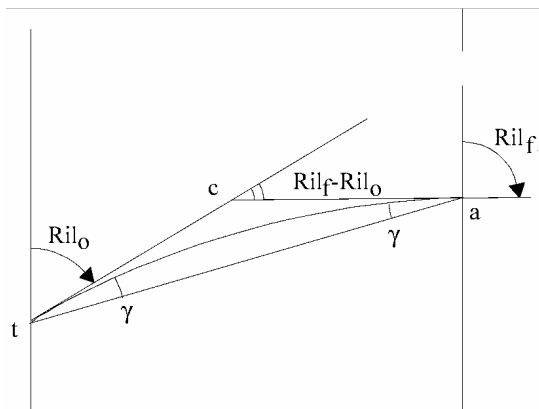
**Figura 6.10** – Tracciamento della semiretta di rilevamento sulla carta di Mercatore

L'angolo che esprime la differenza  $Ril_l - Ril_o$  si indica con  $\gamma$  ed è noto con il nome di *correzione di Givry* o anche con la denominazione di *semiconvergenza dei meridiani*. Infatti, dalla figura 6.11, nell'ipotesi in cui l'arco di ortodromia  $ta$  si può considerare come un arco di circonferenza di cui la lossodromia è la corda,  $Ril_f - Ril_o$  ( $Ril_f$  è il rilevamento finale) rappresenta la convergenza dei meridiani uguale a  $\Delta\lambda \text{ sen } \varphi_m$  (essendo  $\varphi_m$  la latitudine media di  $T$  e  $A$ ) e dal triangolo  $act$  si ha che l'angolo esterno ( $Ril_f - Ril_o$ ) è uguale alla somma dei due angoli interni non adiacenti ( $\gamma + \gamma$ ); pertanto:

$$Ril_f - Ril_o = \Delta\lambda \operatorname{sen} \varphi_m = 2\gamma$$

da cui:

$$\gamma = \frac{\Delta\lambda}{2} \operatorname{sen} \varphi_m \quad (6.2)$$



**Figura 6.11** – Correzione di Givry

Convenendo di contare i rilevamenti da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , la correzione di Givry, è positiva, nell'emisfero nord, se l'aeromobile A è ad est della stazione, negativa nel caso contrario (nell'emisfero sud si ha l'opposto).

La seguente tabella 6.2 fornisce i valori della correzione di Givry.

**Tabella 6.2** – Correzione di Givry in funzione della differenza di longitudine (elemento orizzontale) e della latitudine media (elemento verticale)

$\varphi \mid \Delta\lambda$	$0^\circ$	$2^\circ$	$4^\circ$	$6^\circ$	$8^\circ$	$10^\circ$
$0^\circ$	0	0	0	0	0	0
$10^\circ$	0	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9
$20^\circ$	0	0.3	0.7	1.0	1.4	1.7
$30^\circ$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$40^\circ$	0	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2
$50^\circ$	0	0.8	1.5	2.3	3.1	3.8
$60^\circ$	0	0.9	1.7	2.6	3.5	4.3
$70^\circ$	0	0.9	1.9	2.8	3.8	4.7

### ESEMPIO 6.1

Un aeromobile in posizione stimata  $\varphi = 40^\circ.5 N$ ;  $\lambda = 13^\circ.5 E$  viene rilevato simultaneamente dalle seguenti stazioni VDF (VHF Direction Finding stations):

Ciampino:  $\varphi = 41^{\circ} 48'.3 N$ ;  $\lambda = 12^{\circ} 35'.3 E$  per  $Ril_o = 150^{\circ}$

Napoli:  $\varphi = 40^{\circ} 53'.1 N$ ;  $\lambda = 14^{\circ} 17'.9 E$  per  $Ril_o = 260^{\circ}$

Tracciare le semirette di rilevamento su una carta di Mercatore e determinare la posizione dell'aeromobile.

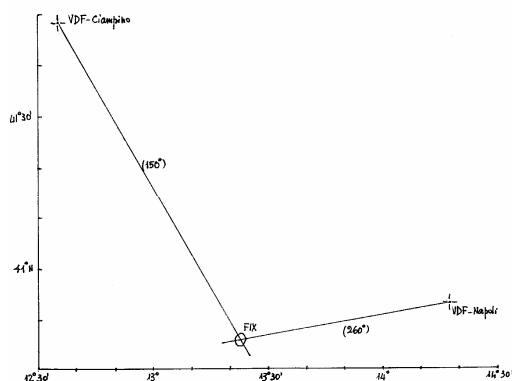


Figura 6.12 – Tracciamento delle semirette di rilevamento

Costruita la carta di Mercatore per la zona da rappresentare e posizionate le due stazioni, si tracciano da esse le rispettive semirette di rilevamento notando che la correzione di Givry, in questo esempio, può essere trascurata (fig. 6.12).

Si ricava:  $\varphi = 40^{\circ} 46'.4 N$ ;  $\lambda = 13^{\circ} 22'.0 E$ .

#### 6.4 Sistemi radiogoniometrici a commutazione d'antenna

Gli impianti radiogoniometrici al suolo hanno avuto un'evoluzione che ha consentito di ottenere prestazioni sempre più soddisfacenti. Originariamente la determinazione della direzione di provenienza delle onde elettromagnetiche emesse dal trasmettitore di bordo veniva effettuata ruotando a mano l'antenna a telaio; successivamente la ricerca del segnale zero avveniva automaticamente mediante telai mobili o attraverso la rotazione di una bobina di ricerca collocata nel campo magnetico generato dai telai fissi.

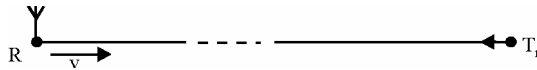
Più recentemente le antenne a telaio tradizionali sono state sostituite da un equipaggiamento che sfrutta l'effetto Doppler di cui si espone qui di seguito il principio.

Si abbia un trasmettitore  $T_r$  che emette un'onda sinusoidale di frequenza  $f$  e un ricevitore  $R$ ; se entrambi sono fissi il segnale viene ricevuto in modo che l'intervallo tra due massimi consecutivi (o cicli) è uguale al periodo  $T$  pari all'inverso della frequenza  $f$ .

Se, invece, il ricevitore si avvicina al trasmettitore con una velocità  $v$  (o, viceversa, il trasmettitore si avvicina al ricevitore alla stessa velocità), esso

nell'intervallo di tempo  $T$  percorre uno spazio  $vT$  per cui il secondo ciclo arriva al ricevitore dopo un intervallo  $T'$  (minore di  $T$ ) uguale a (fig. 6.13):

$$T' = T - \frac{vT}{c} = T(1 - v/c)$$



**Figura 6.13** – Effetto Doppler

Poiché i periodi  $T$  sono inversamente proporzionali alle frequenze  $f$ , la relazione precedente diventa:

$$f' = f \frac{1}{1 - v/c}$$

Moltiplicando e dividendo il secondo membro per  $(1+v/c)$  e trascurando il denominatore, essendo  $v^2/c^2$  una quantità infinitesima, si ha:

$$f' = f(1 + v/c)$$

da cui:

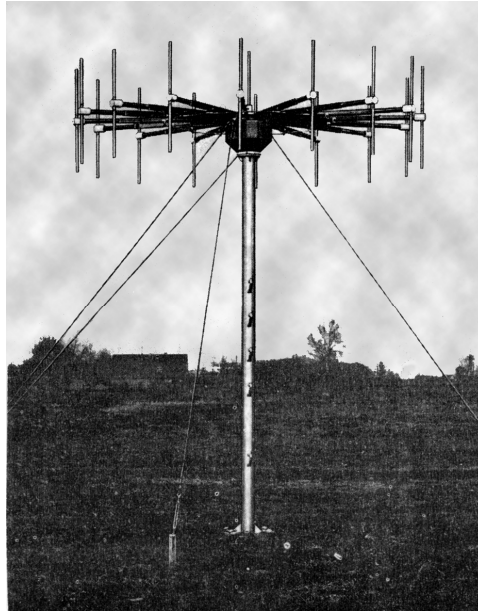
$$\Delta f = f' - f = \frac{1}{\lambda} v \quad (6.3)$$

In conclusione, se il trasmettitore e il ricevitore si avvicinano l'uno all'altro con velocità  $v$  (velocità radiale), il segnale, emesso a una frequenza  $f$ , verrà ricevuto ad una frequenza  $f + \Delta f$ . Il contrario si ha nel caso in cui  $T_r$  e  $T$  si allontanano l'uno dall'altro; il segnale verrà ricevuto ad una frequenza  $f - \Delta f$ .

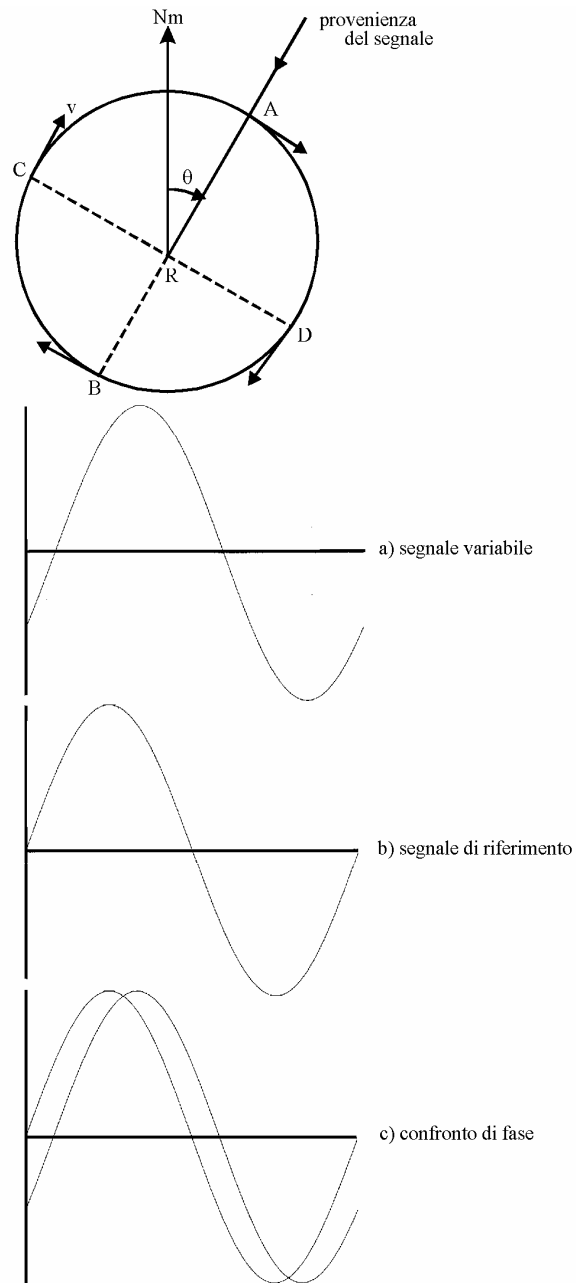
L'effetto Doppler si manifesta anche con le onde acustiche; classico è l'esempio del fischio del treno che cambia di tonalità a seconda che il treno si avvicina o si allontana rispetto all'osservatore.

Sull'effetto Doppler si basano i sistemi radiogoniometrici *CADF* (*Commutated Aerial Direction Finder*) la cui antenna è formata da un certo numero di dipoli verticali disposti uniformemente lungo una circonferenza e collegati singolarmente, a turno, a un ricevitore. Al centro della circonferenza vi è un ulteriore dipolo verticale collegato a un secondo ricevitore (fig. 6.14).

La commutazione ciclica delle antenne, ottenuta attraverso un dispositivo detto *commutatore d'antenna*, simula il movimento circolare dell'antenna che, pertanto, in un giro rileverà la frequenza  $f$  nei punti  $A$  e  $B$ , in quanto in detti punti la velocità radiale dell'antenna (proiezione della velocità  $v$  lungo la direzione  $R-T$ ) è nulla, e le frequenze  $f + \Delta f$  e  $f - \Delta f$  nei punti  $C$  e  $D$  nei quali la velocità radiale è massima (fig. 6.15).



**Figura 6.14** – Antenna di una stazione radiogoniometrica *CADC*



**Figura 6.15** – Determinazione del rilevamento dell'aeromobile