

La navigazione nelle regioni polari

1 Generalità

La navigazione aerea nelle regioni polari artiche presenta un elevato interesse in quanto nell'emisfero settentrionale vi è la maggior parte delle terre emerse e le rotte di collegamento tra le principali città dell'Europa, del nord America e dell'Asia, rappresentate da ortodromie, si sviluppano su aree molto prossime al polo.

In passato le rotte polari sono state poco utilizzate per diversi motivi:

- l'unico sistema per comunicare era affidato alla propagazione ionosferica mediante onde *HF* in quanto l'assenza di stazioni al suolo non consentiva l'impiego di comunicazioni in *VHF* e gli stessi satelliti geostazionari non riuscivano a coprire latitudini superiori a 70° ;
- sui lunghi percorsi gli aeromobili non dotati di sufficiente autonomia avevano la necessità di effettuare scali intermedi non disponibili nelle zone artiche;
- le condizioni meteorologiche, fino all'avvento delle osservazioni effettuate con i satelliti artificiali, non erano ben conosciute;
- il clima di guerra fredda tra i paesi occidentali e l'Unione Sovietica e la Cina non favorivano gli scambi commerciali.

Le moderne tecniche di comunicazione consentono un migliore utilizzo delle frequenze *HF*; infatti di recente sono stati definiti i protocolli di comunicazione che consentono sia le trasmissioni vocali, sia il trasferimento di dati digitali (sistema *HFDL: High Frequency Data Link*) che permettono di collegare il computer di bordo con una rete di stazioni al suolo. In tal modo diviene possibile applicare, anche per le rotte polari, il sistema di sorveglianza *ADS (Automatic Dependent Surveillance)* con il quale, senza l'intervento del pilota, il computer di bordo comunica ai centri di controllo la posizione dell'aeromobile e i parametri di volo che interessano i responsabili del controllo del traffico aereo.

Tutto ciò ha reso possibile l'introduzione di un gran numero di rotte polari e la realizzazione, così come per il nord Atlantico, di rotte di tempo minimo tali da consentire il collegamento tra i principali aeroporti riducendo notevolmente i tempi di volo e i costi derivanti dal consumo di carburante e dalle manutenzioni periodiche.

I benefici saranno ovviamente concentrati sulle tratte che originano o terminano nel Nord America o in Asia, cioè sui mercati più dinamici del mondo in

termini di trasporto passeggeri. In termini pratici seguire una rotta polare significa ridurre di 5 ore il tempo di percorrenza in volo tra New York ed Hong Kong, di 4 ore quello tra Detroit e Pechino o tra Los Angeles e New Delhi, di 2 ore tra Boston e Seul.

Per quanto riguarda le tecniche di navigazione è necessario affrontare i seguenti problemi:

- la rapida convergenza dei meridiani rende necessario definire tecniche diverse per l'impiego delle carte aeronautiche;
- la debole componente orizzontale H del campo magnetico terrestre, la rapidità con cui varia la declinazione magnetica e le possibili perturbazioni magnetiche rendono impossibile l'impiego della bussola magnetica.

2 Navigazione col reticolo

Una carta aeronautica ideale dovrebbe avere i seguenti requisiti:

- conservare gli angoli, cioè essere isogona;
- rettificare le ortodromie;
- le variazioni di scala devono essere trascurabili, cioè la carta deve essere equidistante.

Le carte aeronautiche che rispondono a tali requisiti sono:

- la carta di Mercatore per la zona compresa tra i paralleli 15° S e 15° N;
- la carta di Lambert, fino alla latitudine di 80° , purché la differenza di latitudine tra i due paralleli standard non sia eccessiva;
- la proiezione stereografica polare, per una zona la cui latitudine sia maggiore di 75° .

Sulla carta di Mercatore, entro i predetti limiti, i meridiani e i paralleli formano un reticolato ortogonale tale da poter utilizzare la stessa unità di misura per le ascisse e le ordinate (un primo di meridiano è anche uguale a un primo di equatore in quanto si può considerare il modulo di riduzione lineare unitario). Inoltre la carta è isogona e le ortodromie, con buona approssimazione, possono ritenersi rettificata.

Sulla carta di Lambert i meridiani sono rappresentati da rette convergenti nel polo; l'angolo tra due meridiani è uguale alla differenza di longitudine per la costante di convergenza k (sempre minore di 1) che è una nota funzione delle latitudini dei due paralleli standard. I paralleli, invece, sono rappresentati da archi di circonferenza il cui centro coincide con la rappresentazione del polo. Questo tipo di carta è isogona e nei limiti innanzi definiti rettifica le ortodromie.

Analoghe proprietà ha la proiezione stereografica polare che, tuttavia, rispetto alla carta di Lambert, ha la costante di convergenza k uguale a 1 e, di conseguenza, i meridiani formano tra loro un angolo uguale alla differenza di longitudine.

È conveniente sovrapporre al reticolato geografico di queste due carte un insieme di rette tra loro parallele (*pseudomeridiani*) aventi tutte la stessa direzione di un meridiano di riferimento (di solito coincidente con il meridiano di Greenwich).

Talvolta viene anche tracciato un secondo fascio di rette perpendicolari alle precedenti (*pseudoparalleli*) ottenendo in tal modo un reticolato identico a quello descritto per la carta di Mercatore.

L'applicazione di questo reticolo è tanto più utile quanto maggiore è la latitudine come può vedersi dalla figura 1 che mostra una carta stereografica polare sulla quale sono tracciate le ortodromie AB e $A'B'$ che tagliano i meridiani sotto angoli variabili.

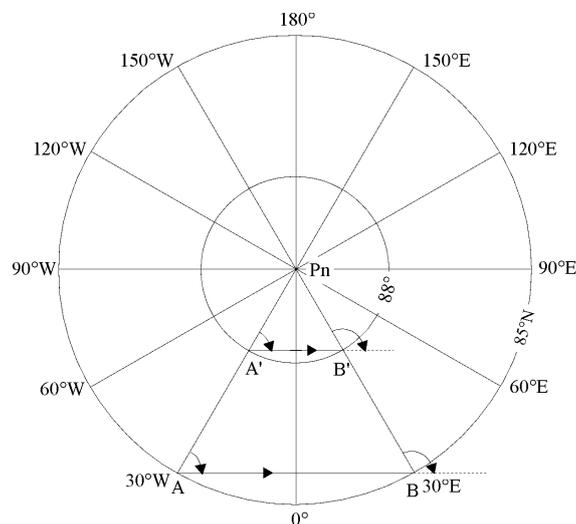


Figura 1 – La convergenza dei meridiani impone che per seguire una traiettoria rettilinea sulla carta si debba cambiare continuamente rotta

Per entrambe le ortodromie la rotta iniziale è uguale a 060° mentre quella finale è di 120° ; di conseguenza per percorrere il tratto AB , avente una lunghezza pari a 300 NM, occorre modificare la rotta mediamente di 1° ogni 5 NM mentre, per il secondo tratto $A'B'$ avente lunghezza uguale a 120 NM, la stessa variazione deve essere fatta in media ogni 2 NM.

Sovrapponendo, invece, alla carta un reticolo formato da rette parallele al meridiano di Greenwich, si vede (fig. 2) che in entrambi i casi le traiettorie formano con la direzione dei meridiani fittizi un angolo costante di 90° .

La successiva figura 3 rappresenta una carta di Lambert sulla quale è stato sovrapposto un reticolo parallelo al meridiano di Greenwich e orientato da Greenwich verso nord.

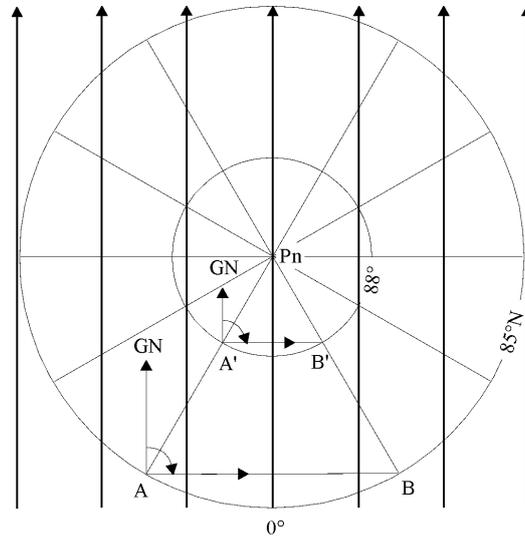


Figura 2 – Sovrapponendo su una carta stereografica polare un reticolo, una traiettoria rettilinea taglia i meridiani fittizi con un angolo costante

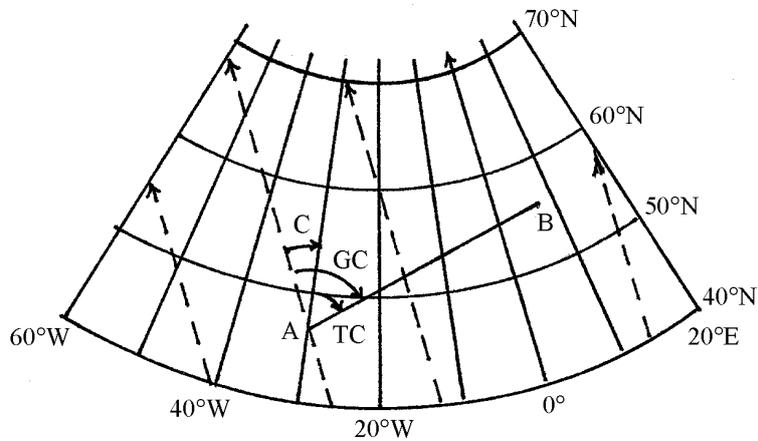


Figura 3 – Carta di Lambert con reticolo sovrapposto

La congiungente i punti *A* e *B* rappresenta l'ortodromia che taglia i meridiani del reticolo con un angolo costante *GC* (*Grid Course*) contato in senso orario da 0° a 360°, mentre, rispetto ai meridiani geografici, forma angoli variabili uguali alla rotta vera *TC* (*True Course*). Dalla figura si ha:

$$GC = TC + C \quad (1)$$

dove C è la *convergenza*, definita dal prodotto $k\Delta\lambda$, essendo k la costante di convergenza e $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ la differenza di longitudine rispetto al meridiano di riferimento λ_0 (nel caso della figura $\Delta\lambda = \lambda$ avendo scelto come meridiano di riferimento quello di Greenwich).

La convergenza C è positiva (caso della figura) se la direzione del nord vero TN (*True North*) capita a est del nord griglia GN (*Grid North*) il che si verifica per longitudini a ovest del meridiano di riferimento.

Rispetto alla direzione del nord magnetico MN (*Magnetic North*) si ha la relazione (fig. 4):

$$GC = MC + VAR + C$$

essendo MC la rotta magnetica e VAR la declinazione.

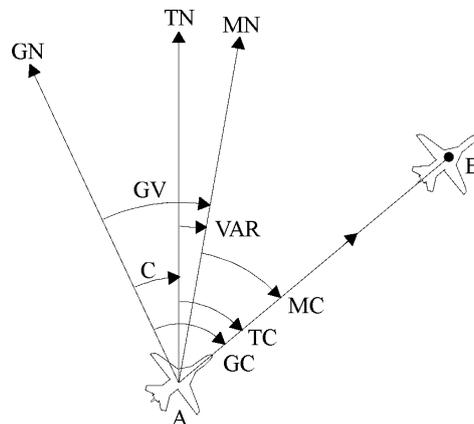


Figura 4 – Relazione tra GC, TC e MC

Alla somma algebrica $VAR + C$ si dà il nome di *variazione del reticolo* o di *grivazione* ($GV = Grivation$) e, pertanto:

$$GV = VAR + C \quad (2)$$

e di conseguenza:

$$GC = MC + GV \quad (3)$$

Per evitare il computo separato della declinazione magnetica e della convergenza, sulle carte possono essere tracciate direttamente le curve di uguale grivazione, dette *isogrive*, assieme alle linee di uguale declinazione magnetica (*isogone*).

La figura 5 rappresenta una zona della *MID ATLANTIC PLOTTING CHART* prodotta dalla Jeppesen (paralleli standard a 45° N e 65° N e costante di convergenza $k = 0.82$) su cui sono tracciate le isogone (curve a trattini), le isogrive (curve a punti) e i meridiani fittizi paralleli al meridiano di Greenwich (linee continue con il simbolo di una freccia).



Figura 5 – Particolare della JEPPESEN MID ATLANTIC PLOTTING CHART

ESEMPIO 1

Su una carta di Lambert (costante di convergenza 0.82) viene tracciata da un punto A ($\varphi = 53^\circ N$; $\lambda = 34^\circ W$) una retta formante con il meridiano un angolo di 60° (rotta iniziale).

Calcolare la GC, la GV e la MC sapendo che nel punto A la declinazione magnetica è $24^\circ W$.

Si calcola la convergenza C effettuando il prodotto tra la costante di convergenza k (uguale a 0.82) e la differenza di longitudine rispetto al meridiano di riferimento (uguale a 34°); si ottiene $C \cong +28^\circ$.

Dalla (1) si ricava $GC = 88^\circ$. La grivazione GV si ottiene sommando algebricamente la convergenza C alla declinazione magnetica VAR ; si ha:

$$GV = +28^\circ + (-24^\circ) = 4^\circ E$$

mentre la rotta magnetica MC si può ottenere con una delle due relazioni:

$$MC = GC - GV = 88^\circ - (+4^\circ) = 84^\circ$$

$$MC = TC - VAR = 60^\circ - (-4^\circ) = 84^\circ$$

Da quanto esposto è evidente il vantaggio che si consegue usando la carta di Lambert al posto della carta di Mercatore: su quest'ultima, infatti, la congiungente due punti rappresenta la lossodromia in quanto taglia i meridiani con un angolo costante TC legato alla rotta magnetica MC dalla relazione:

$$TC = MC + VAR$$

La declinazione è ricavata dalle isogone tracciate sulla carta e la traiettoria viene seguita ricavando dalla relazione precedente la rotta magnetica e mantenendo tale valore mediante la bussola magnetica.

Con la carta di Lambert, invece, la retta tracciata rappresenta, con buona approssimazione, un'ortodromia che taglia i meridiani fittizi sotto un angolo costante GC legato a MC dalla relazione (3); pertanto il pilota otterrà la MC ricavando la GV dalle isogrive e opererà in modo del tutto analogo al caso precedente conseguendo il vantaggio di seguire la traiettoria più breve.

Un indiscusso vantaggio presenta l'uso del reticolo quando si naviga a latitudini elevate con l'ausilio della carta stereografica polare: in essa i meridiani sono semirette convergenti al polo e i paralleli circonferenze concentriche; la congiungente i punti A e B rappresenta, con buona approssimazione, l'ortodromia che taglia i meridiani con angoli tanto più variabili quanto più la traiettoria è prossima al polo.

Sulla carta può essere tracciato un reticolo di meridiani fittizi paralleli al meridiano di Greenwich e orientati nel senso Greenwich-Polo nord; rispetto a tali pseudomeridiani l'ortodromia forma un angolo GC costante (fig. 6).

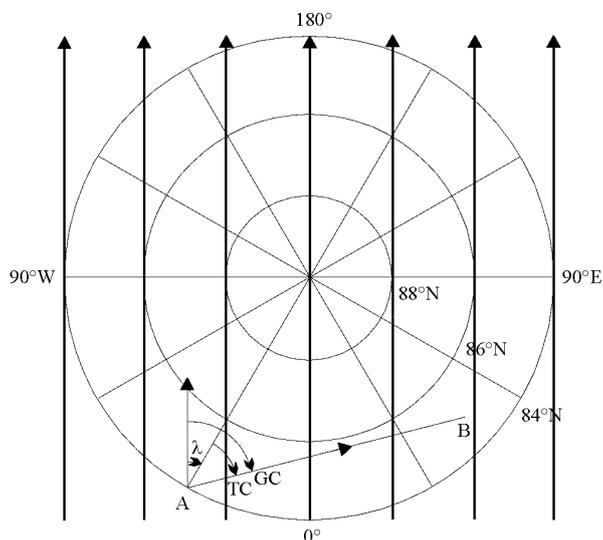


Figura 6 – Proiezione stereografica polare con reticolo sovrapposto

La relazione che lega GC con TC è data da:

$$GC = TC + \lambda \quad (4)$$

dove alla longitudine λ si attribuisce, nell'emisfero nord, il segno positivo se ovest, negativo se est. La (4) è analoga alla (1) in quanto la convergenza $C = k\Delta\lambda$, nel caso della stereografica polare, è uguale a λ (essendo $k = 1$ e $\Delta\lambda = \lambda$ quando il meridiano di riferimento coincide col meridiano di Greenwich).

Analogamente si possono tracciare le isogrive ottenute come luoghi nei quali è costante la grivazione GV ottenuta da:

$$GV = VAR + \lambda \quad (5)$$

e, pertanto, la relazione (3) resta valida anche per tale tipo di proiezione.

ESEMPIO 2

Su una carta stereografica polare viene tracciata da un punto A ($\varphi = 84^\circ N$, $\lambda = 30^\circ W$) una retta formante col meridiano un angolo di 45° .

Calcolare la GC , la GV e la MC sapendo che nel punto A si ha $VAR = 045^\circ W$.

Dalla (4) si ricava:

$$GC = TC + \lambda = 45^\circ + (+30^\circ) = 75^\circ$$

La grivazione GV si ottiene applicando la (5):

$$GV = VAR + \lambda = -45^\circ + (+30^\circ) = 15^\circ \text{ W}$$

mentre la rotta magnetica MC si può ottenere con una delle due relazioni:

$$MC = GC - GV = 75^\circ - (-15^\circ) = 90^\circ$$

$$MC = TC - VAR = 45^\circ - (-45^\circ) = 90^\circ$$

Tenendo conto della correzione GV si può quindi ricavare la MC necessaria per mantenere GC costante, per cui l'aeromobile viene a percorrere una traiettoria rettilinea che si avvicina molto all'ortodromia se si limita l'uso della carta a una zona terrestre prossima al polo.

Restano, tuttavia, le limitazioni della bussola magnetica alle alte latitudini a causa delle deboli forze direttive cui è soggetto l'equipaggio magnetico della bussola.

Per l'emisfero sud poiché, sia per la carta di Lambert, sia per la proiezione stereografica, i meridiani convergono nel polo sud, le relazioni (1) e (4) restano immutate con la sola differenza che la convergenza C o la longitudine λ è considerata positiva per longitudini a est del meridiano di riferimento e negativa nel caso contrario.

Qui di seguito sono proposti altri esempi relativi all'uso del reticolo.

ESEMPIO 3

Un aeromobile, in $\lambda = 010^\circ \text{ E}$, sta seguendo una traiettoria rettilinea che forma, rispetto a un reticolo realizzato su una carta di Lambert (costante di convergenza $k = 0.8$) per l'emisfero nord, una $GC = 180^\circ$; la rotta magnetica è $MC = 150^\circ$.

Ricavare la longitudine del meridiano di riferimento sapendo che la declinazione magnetica della zona è $VAR = 10^\circ \text{ W}$.

Si ricava la TC dalla relazione $TC = MC + VAR$:

$$TC = 150^\circ + (-10^\circ) = 140^\circ;$$

Si ricava poi la convergenza C dalla relazione: $C = GC - TC$:

$$C = 180^\circ - 140^\circ = +040^\circ.$$

La convergenza C è uguale a $C = k\Delta\lambda$; pertanto $\Delta\lambda = C/k$:

$$\Delta\lambda = 40^\circ/0.8 = 050^\circ \text{ W da cui si ricava: } \lambda_0 = \lambda - \Delta\lambda = +010^\circ - (-050^\circ) = 060^\circ \text{ E.}$$

ESEMPIO 4

Un aeromobile, nel punto di longitudine 050° E , vola mantenendo una $GC = 224^\circ$ rispetto a un reticolo sovrapposto a una carta di Lambert con paralleli standard 40°

N e 46° N e meridiano di riferimento $\lambda_0 = 20^\circ W$. Calcolare la MC sapendo che la declinazione magnetica è VAR = 8° W.

Si calcola dapprima il coefficiente di convergenza della carta, che si può approssimare al seno della latitudine media dei due paralleli standard:

$$k = \text{sen } 43^\circ \cong 0.682$$

È possibile ora ricavare l'angolo di convergenza C:

$$C = k(\lambda - \lambda_0) = 0.682 [-050^\circ - (+20^\circ)] = -47^\circ.7$$

La convergenza è negativa in quanto l'aeromobile si trova a est del meridiano di riferimento.

Si ricava la TC dalla relazione $TC = GC - C$:

$$TC = 224^\circ - (-47^\circ.7) = 271^\circ.7$$

Si calcola, infine, la MC:

$$MC = TC - VAR = 271^\circ.7 - (-8^\circ) = 279^\circ.7$$

ESEMPIO 5

Un aeromobile è in volo con GC = 210° in $\varphi = 75^\circ S$, $\lambda = 020^\circ W$ con riferimento a un reticolo sovrapposto a una proiezione stereografica polare. Ricavare la TC.

Si ricava la TC dalla relazione $TC = GC - \lambda$:

$$TC = 210^\circ - (-020^\circ) = 230^\circ$$

La longitudine, di segno W, per l'emisfero sud è considerata negativa.

ESEMPIO 6

Un aeromobile è in volo nell'emisfero nord con GC = 310° e MC = 340° in una zona con VAR = 10° E. Il reticolo è ottenuto da una carta di Lambert, la cui costante di convergenza è 0.8, scegliendo come meridiano di riferimento quello di longitudine 040° W. Calcolare la longitudine dell'aeromobile.

Si calcola l'angolo di convergenza dalla relazione $C = GC - TC$:

$$C = 310^\circ - (340^\circ + 10^\circ) = -40^\circ$$

Si ricava, nota la costante di convergenza k, la differenza di longitudine $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda = C / k = -40^\circ / 0.8 = -50^\circ = 50^\circ E$$

Si ricava, infine, la longitudine dalla relazione:

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = -040^\circ + 050^\circ = 010^\circ E$$

ESEMPIO 7

Un aeromobile in $\varphi = 50^\circ N$, $\lambda = 20^\circ W$ vola con $GC = 257^\circ$ rispetto a un reticolo realizzato su una carta di Lambert con meridiano di riferimento $050^\circ W$ e costante di convergenza 0.7 . Calcolare la MC sapendo che $VAR = 8^\circ W$.

La convergenza del meridiano è uguale a $0.7 \times (-020^\circ + 050^\circ) = 21^\circ$; pertanto $C = -21^\circ$ in quanto l'aeromobile si trova a est rispetto al meridiano di riferimento:

$$TC = GC - C = 257^\circ - (-21^\circ) = 278^\circ$$

La rotta magnetica è ottenuta da: $MC = TC - VAR = 278^\circ - (-8^\circ) = 286^\circ$.

3 Uso del girodirezionale nelle regioni polari

Navigando in zone di latitudini elevate non è più possibile fare affidamento sulla bussola magnetica ed è, pertanto, necessario usare il direzionale giroscopico o la bussola giromagnetica in modalità *DG (Directional Gyro Operations)* (cfr. par. 6.18 del volume 1).

Mentre la bussola magnetica indica una direzione riferita alla superficie terrestre (la direzione del nord magnetico), il direzionale giroscopico indica una direzione inerziale ed è soggetto a derive che possono essere *reali* o *apparenti*.

La *deriva reale* è dovuta a imperfezioni nella realizzazione dello strumento; essa di solito è inferiore a $1^\circ/h$: è possibile compensarla soltanto se il girodirezionale è confrontato con un riferimento direzionale esente da errori.

Le *derive apparenti* (dette anche *precessioni*) sono dovute alle seguenti cause:

- alla rotazione terrestre (*Earth Rate Precession*);
- alla convergenza dei meridiani (*Transport Precession*);
- alla presenza del reticolo (*Grid Transport Precession*).

A causa della rotazione terrestre, mentre l'asse del giroscopio mantenuto nel piano orizzontale resta fisso rispetto allo spazio inerziale, la linea meridiana nell'emisfero nord ruota verso ovest con una velocità angolare pari a $\sigma \sin \varphi$, essendo σ uguale a $15.04^\circ/h$ e φ la latitudine (la rotazione avviene verso est nell'emisfero sud).

Di conseguenza, sempre nell'emisfero nord, l'asse del giroscopio subisce una deriva apparente, verso est, di pari velocità angolare. Tale deriva può essere compensata applicando al giroscopio una coppia di precessione, posizionando un selettore (*Latitude Correction Knob*) sul valore della latitudine. Con questa correzione l'asse del giroscopio, posizionato inizialmente nel piano del meridiano, tende a conservare tale direzione.

Quando l'aeromobile si sposta, con una componente di velocità verso est o verso ovest, la convergenza dei meridiani dà luogo a una seconda deriva apparente in quanto l'asse del giroscopio resta fisso nel piano del meridiano di partenza. Questa

seconda deriva può essere eliminata adottando il reticolo; infatti, in questo caso, la direzione dei meridiani fittizi si mantiene costante.

Ma anche col reticolo nasce una piccola deriva apparente poiché la convergenza dei meridiani sulla Terra sferica è uguale a $\Delta\lambda \operatorname{sen} \varphi$ mentre sulla carta di navigazione è uguale a $k\Delta\lambda$; di conseguenza vi sarà una deriva pari a:

$$\textit{Grid Transport} = \Delta\lambda \operatorname{sen} \varphi - k\Delta\lambda = \Delta\lambda(\operatorname{sen} \varphi - k)$$

Per esempio, utilizzando una carta (come quella mostrata nella figura 5) con $k = 0.82$, volendo percorrere in 2 ore una tratta la cui differenza di longitudine è 30° a una latitudine media di 64° , si ha una deriva apparente uguale a:

$$30^\circ(\operatorname{sen} 64^\circ - 0.82) / 2^{\text{h}} \cong 1.2^\circ/\text{h}$$

Questa deriva può essere compensata disponendo il selettore su un valore diverso di latitudine: anziché sul valore 64° (che produce una precessione di $13.5^\circ/\text{h}$), su un valore tale da produrre una precessione di $13.5 + 1.2$ o $13.5 - 1.2^\circ/\text{h}$ (a seconda del segno della *grid transport precession*), ovvero sui valori 78° N o 55° N .

Si procede in maniera analoga qualora si intenda correggere la deriva reale del giroscopio nell'ipotesi in cui essa sia nota.