



Strumenti e sistemi di navigazione

1



Considerazioni generali

- Complessità dipendente da categoria velivolo: aliante vs. militare
- Complessità crescente nella storia del volo: i primi voli completamente senza strumenti

2



Strumenti

- Bussola magnetica
- Altimetro
- Anemometro
- Indicatore di velocità verticale
- Orizzonte artificiale
- Indicatore di virata
- Girodirezionale
- Girobussola

3



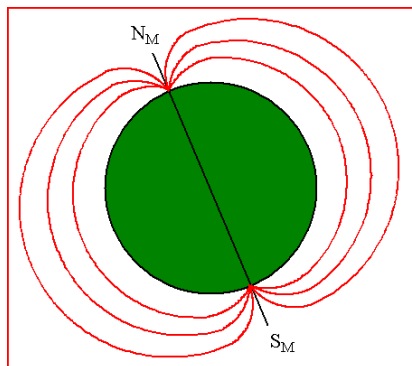
Avionica

- Radar
- ADF
- VOR/DME e TACAN
- Sistemi di navigazione iperbolica
- GPS e DGPS
- Sistemi di navigazione autonoma
- Sistemi per l'atterraggio strumentale

4

Bussola magnetica

- Lo strumento più antico
- Basato sul campo magnetico terrestre

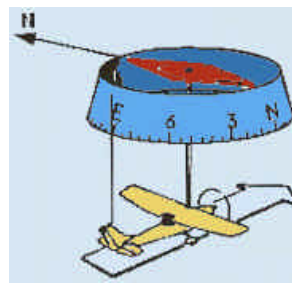


5

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Funzionamento

- Ago magnetico si allinea col campo
- Ago libero di orientarsi
- Rosa graduata montata sull'ago
- Linea di fede solidale con velivolo

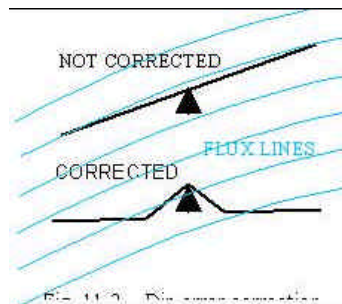


6

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Errore di inclinazione

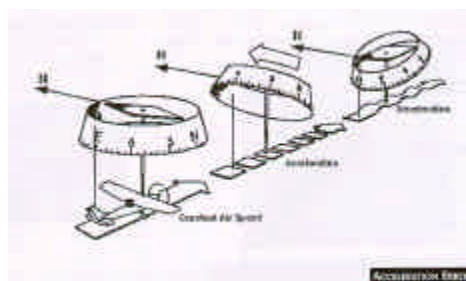
- Solo alle alte latitudini
- Linee di flusso inclinate rispetto all'orizzonte
- Correzione: ago sospeso sopra al CG



7

Errore di accelerazione

- Sensibilità a accelerazioni di inerzia
- Correzione: immersione della rosa in liquido smorzante



8



Errore di declinazione

- Non coincidenza assi magnetico e geografico
- Presenza di giacimenti ferrosi
- Correzione: riportata sulle carte nautiche ed aggiornata

9



Errore di deviazione

- Disturbi dovuti a masse metalliche e sistemi elettrici/elettronici di bordo
- Correzione: giri di bussola in aeroporto con traguardi noti

10

Altimetro



- Fornisce quota in base alla pressione esterna

11

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la vendita.

Modello della stratosfera

Legge di Stevino: $dp = -\rho \cdot g \cdot dz$

p = pressione

ρ = densità

g = gravità

z = altezza

Equazione di stato dei gas perfetti: $p = \rho \cdot R \cdot T$

R = costante universale ($287 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$)

T = temperatura

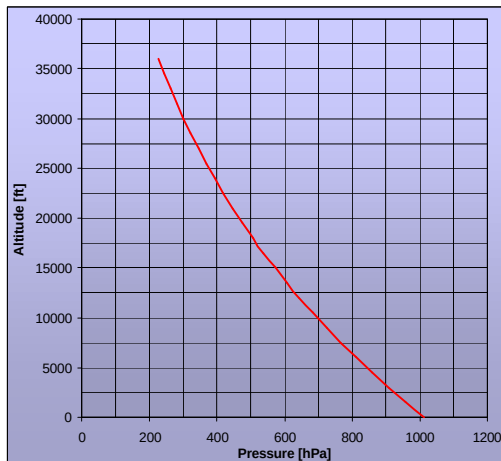
Variazione termica con la quota: $dT = -a \cdot dz$

a = gradiente termico ($6.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$)

12

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la vendita.

Pressione in funzione della quota

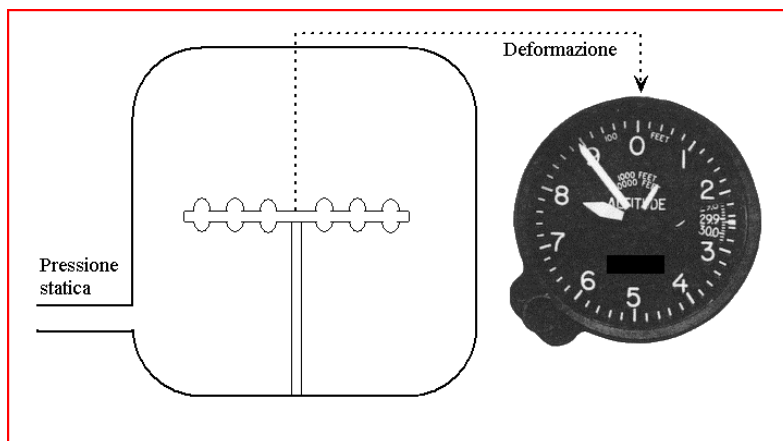


$$\frac{p}{p_0} = \left(1 - \frac{a \cdot z}{T_0}\right)^{\frac{g}{R \cdot a}}$$

p_0 e T_0 valori di riferimento

13

Funzionamento



14

Regolazioni

Regolazione	p_0	Quota indicata	Fase del volo
QFE	aeroporto	da aeroporto	bassa quota
QNH	teorica livello mare	da livello mare teorico	bassa quota
QNE	1013.25	da isobara standard	crociera

15

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Anemometro



- Fornisce velocità di volo

16

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Pressione totale, velocità e numero di Mach

$$p_T = p + \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$p_T = p \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

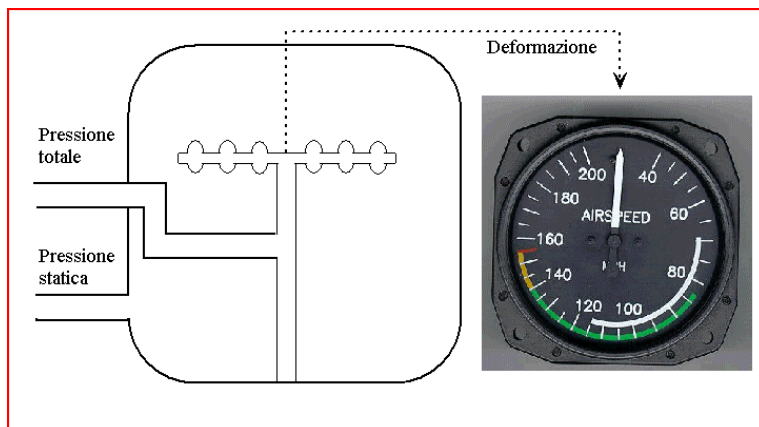
$$M = \frac{v}{c}$$

$$c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}}$$

17

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Funzionamento



18

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Tipi di velocità

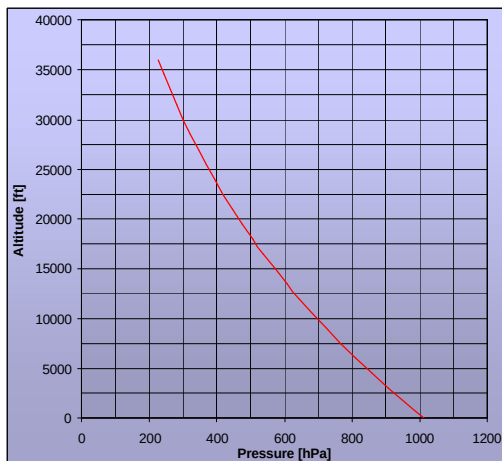
- IAS (indicated)
- CAS (calibrated): corretta da errori
- EAS (equivalent): riferita a quota 0 $V_E = V \sqrt{\frac{r}{r_0}}$
- TAS (true): corretta per comprimibilità

Indicatore di velocità verticale



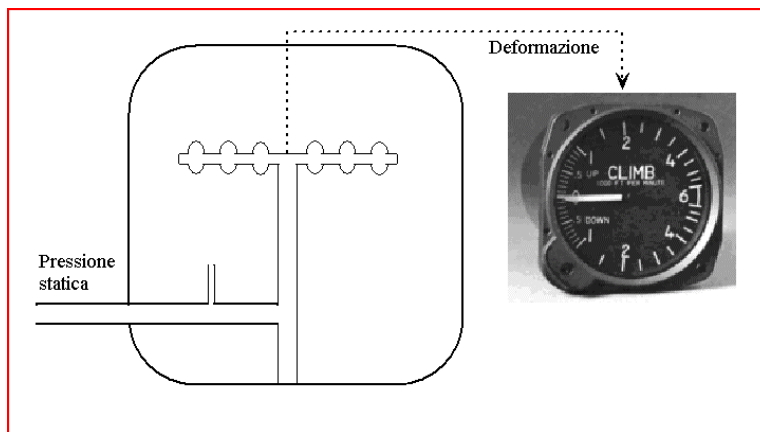
- Fornisce velocità di salita e discesa

Basato su variazione $p(z)$



21

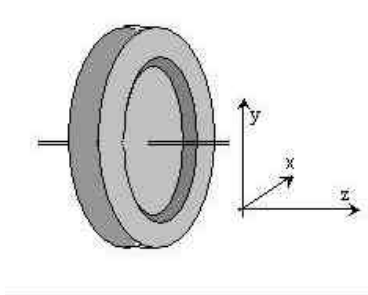
Funzionamento



22

Strumenti giroscopici

- Utilizzati per calcolare angoli e velocità angolari
- Definizione: corpo rigido rotante attorno all'asse di massima inerzia



23

Principali proprietà

- Rigidezza dell'asse giroscopico (per ruotarlo va applicata una coppia superiore a quella per corpo rigido non rotante)
- Precessione (velocità angolare orientata di 90° rispetto coppia e asse giroscopico)

$$w_x = -\frac{M_y}{H}$$

$$w_y = \frac{M_x}{H}$$

$$H = I_z \cdot w_z \quad \text{tenacia}$$

24

Orizzonte artificiale

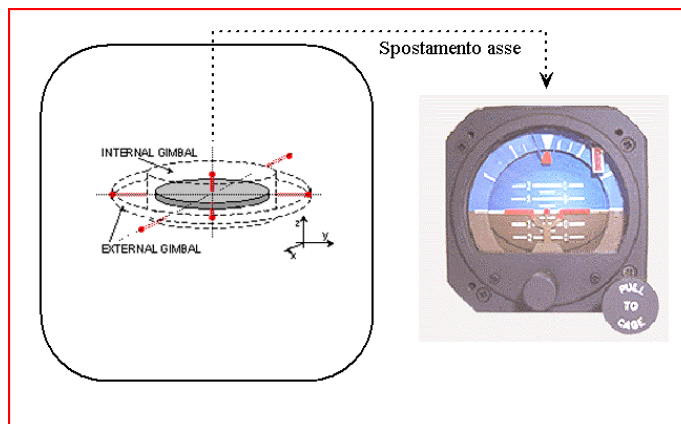


- Fornisce angoli di rollio e beccheggio
- Basato su giroscopio ad asse verticale e 3 gdl

25

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la vendita

Funzionamento



26

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la vendita

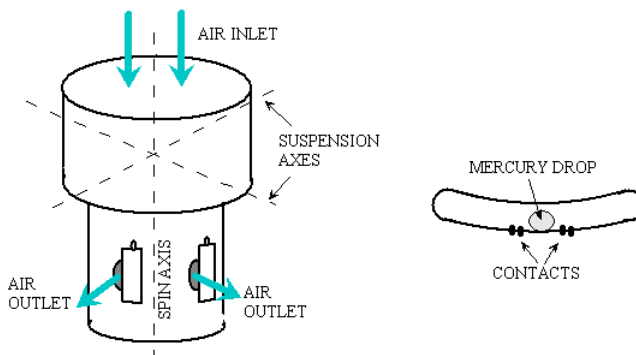
Errore di precessione apparente

- Deriva apparente dovuta a rotazione terrestre e traiettoria velivolo
- Eliminazione tramite *meccanismi erettori*, che tendono ad allineare asse giroscopico con verticale locale (sensibili a forze d'inerzia)

27

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Sistemi erettori



28

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Indicatore di virata

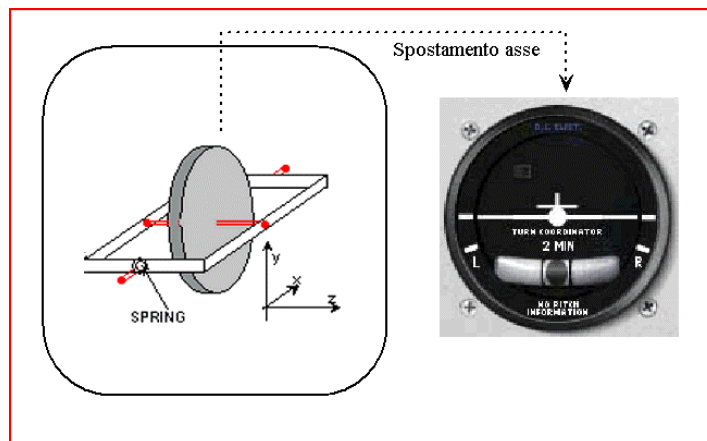


- Fornisce velocità angolare di virata
- Basato su giroscopio ad asse orientato come asse di beccheggio e 2 gdl
- Di solito associato a indicatore di sbandamento

29

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la vendita

Funzionamento



30

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la vendita

Girodirezionale



- Fornisce rotta nel breve periodo
- Basato su giroscopio ad asse orizzontale e 3 gdl

31

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Girobussola

- Girodirezionale associato a valvola di flusso (sensore di direzione di campo magnetico, localizzato in estremità alari)

32

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Giroscopi non meccanici

- Giroscopi laser: un raggio separato in due, canalizzati in anelli di fibre ottiche controcorrenti, misura di diffrazione alla fine
- Sensori microelettromeccanici al silicio: microsistema oscillante, misura di forza di Coriolis

33

Avionica: bande radio

Band	Designation	Frequency	Wavelength
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	3 - 30 GHz	10 - 1 cm
Extr. High Frequency	EHF	30 - 300 GHz	10 - 1 mm

34

Proprietà delle frequenze

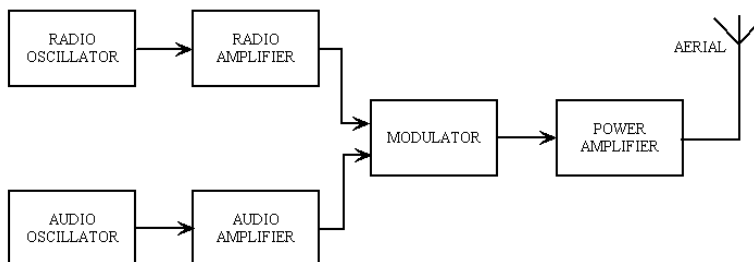
- VLF – MF: lunga portata (riflessione da ionosfera); sensibili a fenomeni atmosferici e attività solare; grandi antenne
- VHF – EHF: portata ottica; meno sensibili a fenomeni atmosferici

35

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Modulazione

- Circuiti oscillanti generano segnale portante (VLF - EHF)
- Circuiti modulanti includono segnale audio



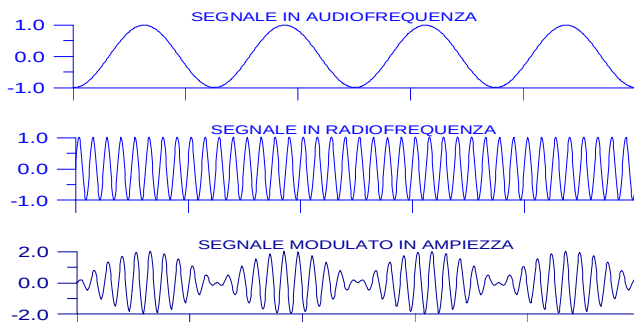
36

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione



Modulazione

Modulazione di ampiezza della portante

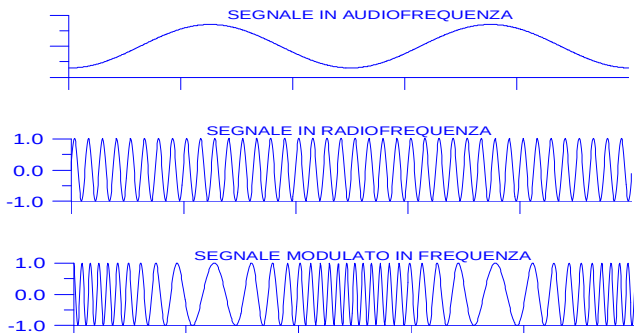


37



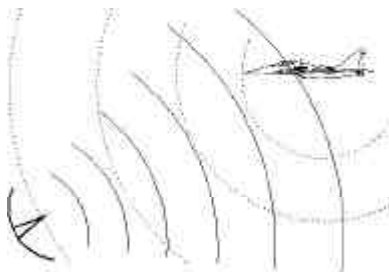
Modulazione

Modulazione di frequenza della portante



38

Radar



- Radio detection and ranging
- Fornisce posizione oggetto

39

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Funzionamento

- Viene inviato segnale ad impulsi molto direzionale ed elevata potenza (magnetron)
- Viene ricevuta l'eco, da amplificare (bassa potenza)
- Distanza misurata in base al tempo trascorso
- Frequenze: UHF - SHF

40

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

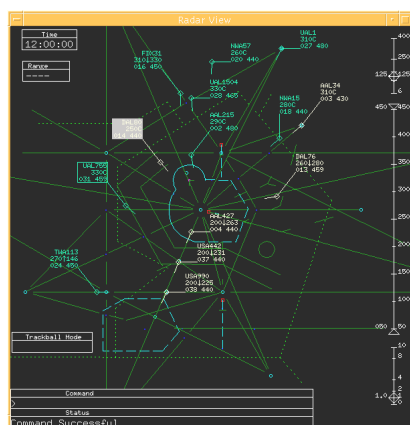
Radar primario

- Antenna a movimento rotatorio, che viene misurato insieme alla distanza, per rilevamento $\rho - \theta$
- Frequenze: UHF
- Portata: 250 nm

41



Radar secondario



- Di solito associato a radar primario
- Invia segnale di richiesta nello spazio aereo
- Transponder ricevente risponde con identificativo, velocità e quota

42

Radar doppler

- Misura la velocità di un oggetto in base alla variazione tra frequenza trasmessa e frequenza dell'eco
- MTI (moving target indication): vengono visualizzati solo oggetti in movimento

43

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Radar altimetro

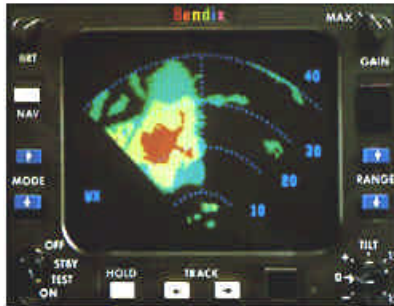


- Fascio di bassa potenza diretto verso il suolo
- Per le alte quote si usa radioaltimetro, basato su emissione di segnale modulato in frequenza e misura dello shift dell'eco

44

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Radar meteorologico



- Riceve eco proporzionale a densità di particelle d'acqua
- Frequenze: SHF
- Collocato nel cono di prua

45

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

ADF



- Automatic direction finder

46

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione



Funzionamento

- Segnale emesso da radiofari MF di terra
- Ricezione tramite antenna non direzionale e direzionale
- Confronto tra i due segnali per individuare direzione onde elettromagnetiche

47



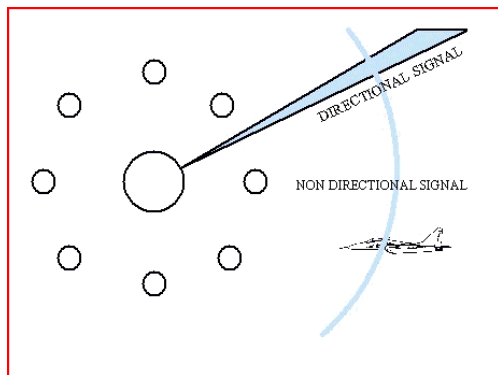
VOR/DME e TACAN



- VHF omni-directional range, distance measuring equipment, tactical air navigation system

48

Funzionamento



Segnale direzionale
rotante

Segnale omnidirezionale
emesso ad ogni passaggio
del segnale direzionale
dal Nord

Radiale funzione dello
sfasamento

49

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la vendita

DME



Trasmettitore di bordo genera
sequenza random di impulsi

Transponder di terra riceve, attende
e ri-genera sequenza

Ricevitore di bordo riconosce,
calcola tempo e distanza

50

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la vendita

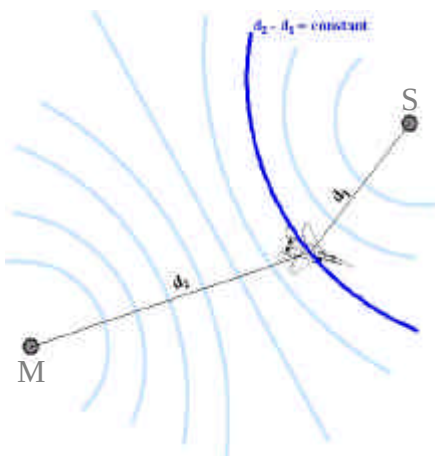
Navigazione iperbolica

- Fornisce coordinate geografiche (lat e long)
- Basato su serie di radiofari sincronizzati a terra alle basse frequenze (portate globali)
- Principali sistemi: Decca (LF), Loran C (LF) e Omega (VLF)
- Precisione dai 100 m alle 2 nm (dipende da sistema e distanza radiofari)
- Loran C attualmente in funzione come back-up GPS, in via di disattivazione

51

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Funzionamento



1. Stazione Master trasmette
2. Stazione Slave riceve e, dopo ritardo Dr , trasmette
3. Stazione di bordo riceve segnale Master e, dopo Dt , segnale Slave
4. Ricevente si trova nel luogo di punti del piano avente differenza di distanza costante da Master e Slave, pari a $c \cdot (Dt - Dr)$
5. Necessarie due coppie di radiofari per il punto

52

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione



GPS

- (Differential) Global Positioning System
- Fornisce coordinate geografiche, altezza e velocità (come derivata tra misure successive)
- Proprietà dell'US DOD, originariamente con segnale degradato per utilizzatori civili, degradazione sospesa nel 2000
- Precisione superiore ai 10 m, fino ai 10-20 cm per DGPS

53

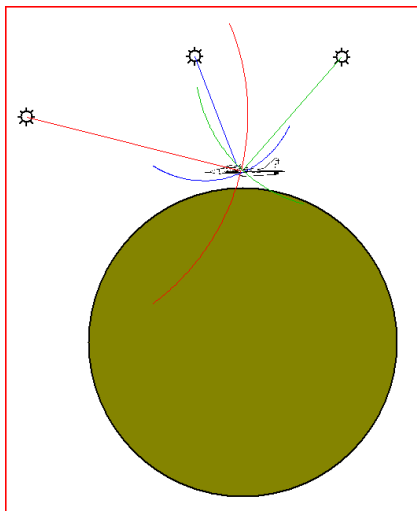


Segmenti GPS

- Segmento spaziale: 24 satelliti su 6 orbite equidistanziate, con 4 satelliti a 90° per orbita
- Segmento terrestre: gruppo di stazioni di terra per il controllo delle effemeridi, le correzioni orbitali e il funzionamento generale
- Segmento utente: ricevitori passivi

54

Funzionamento



Ogni satellite trasmette segnale isotropo UHF contenente:

- Identificativo
- Coordinate satellite (x_i, y_i, z_i)
- Tempo inizio trasmissione

Ricevente misura t_i e calcola distanza d_i da ogni satellite e quindi posizione (x, y, z) :

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2 = c^2 \cdot t_i^2$$

55

Errore di tempo

- Orologi atomici sui satelliti
- Orologi al quarzo nelle riceventi GPS
- $c = 300000 \text{ km/s}$ ($1 \mu\text{s} = 300 \text{ m}$)
- Errore di misurazione tempo t_e , costante in zona: quarta incognita
- Necessario quarto satellite per punto molto più preciso

56



Errori aggiuntivi

- Precisione della posizione del satellite
- Riflessione e rifrazione atmosferica del segnale radio
- Rumore radio
- Posizione satellite sopra l'orizzonte

57



DGPS

- Ipotesi: errore locale costante entro ~ 100 nm (stessi satelliti in vista)
- Gruppo di stazioni a terra fisse, di coordinate note e dotate di ricevente GPS
- Errore locale calcolato dalla stazione di zona ed inviato via radio a riceventi GPS
- Coperture territoriali
- Errori inferiori a 1 m (10 cm se soppressi i rumori)

58

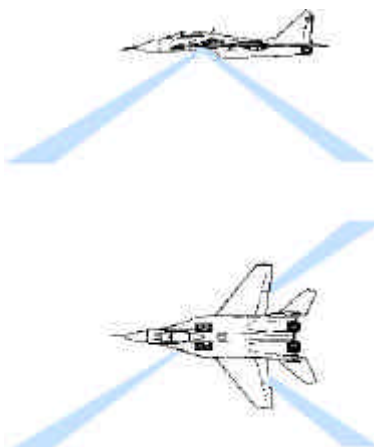
Sistemi di navigazione autonoma

- Forniscono posizione senza assistenza esterna
- Molto importanti per militari
- Due tipi: doppler e inerziale

59

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Navigazione doppler



Fasci radar doppler coerenti e inviati verso terra in 3 o 4 direzioni (configurazione λ o X)

Misurate componenti velocità sulle varie direzioni e rotta

Integrazione nel tempo a partire da posizione nota

Errore accumulato ~ 10 nm ogni 300 nm

60

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

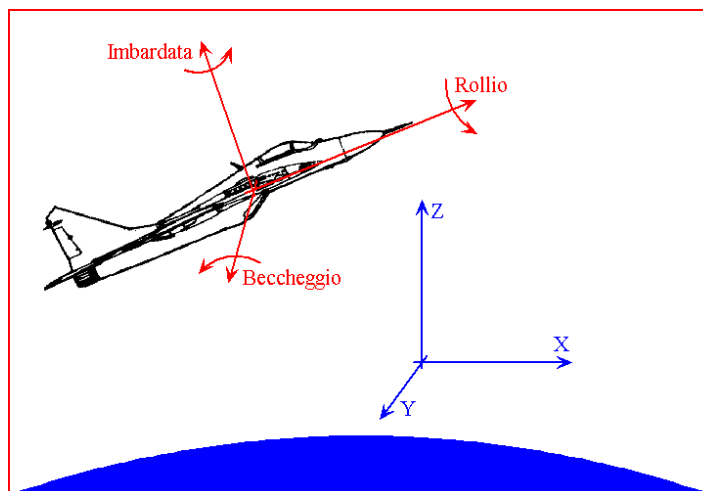
Navigazione inerziale

- Piattaforme inerziali di tipo strapdown: 3 accelerometri (rollio-beccheggio-imbardata) e 3 sensori di velocità angolare (stessi assi)
- Ricostruzione dell'orientamento per integrazione delle rotazioni finite nello spazio
- Distribuzione delle accelerazioni lungo gli assi globali ed integrazione doppia

61

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Navigazione inerziale



62

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

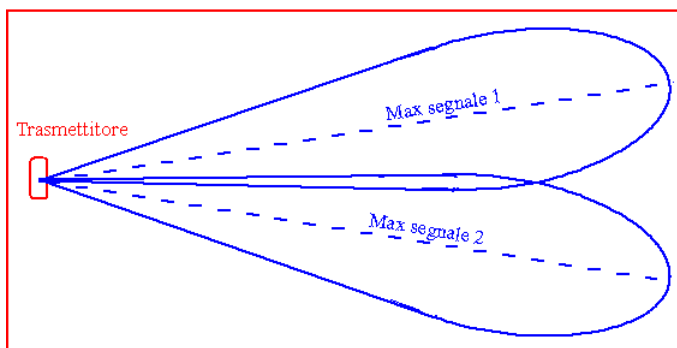
Sistemi per l'atterraggio strumentale

- ILS (Instrument Landing System), normalmente installato negli aeroporti
- MLS (Microwave Landing System), uso militare in fase di estensione

63

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

ILS: principio

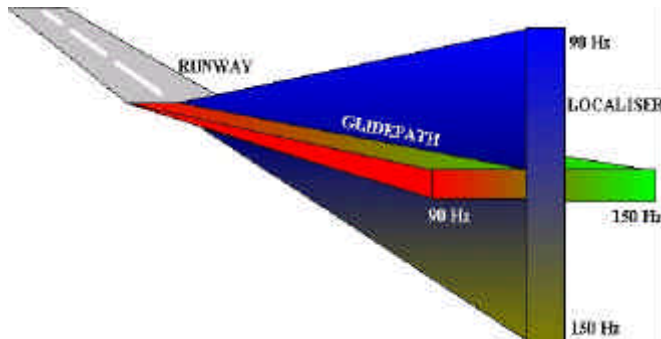


Diagrammi d'intensità di due segnali direzionali

64

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

ILS



Glidepath e localiser generati da due coppie di segnali UHF e VHF modulati in frequenze diverse di 90 e 150 Hz
Ricevitore con misuratore d'intensità delle due modulazioni

65

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Caratteristiche

- Inclinazione glidepath 3°-6°
- Radiofari verticali (marker) sull'allineamento pista a 4, 0.5 e 0.1 nm da inizio, con avvisatori acustici in cabina
- Differenti categorie di ILS a seconda della precisione, la più alta per atterraggio con visibilità nulla e altezza decisionale nulla

66

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

Display



67

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

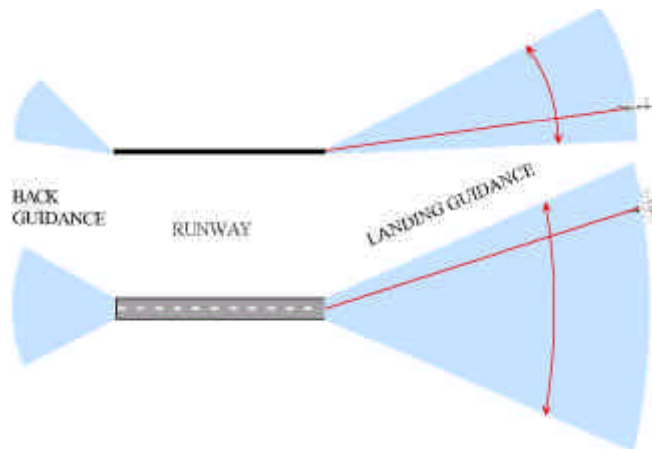
MLS: principio

- Pennello radio SHF illumina settore sul prolungamento pista, in azimuth ($40^\circ - 60^\circ$) ed elevazione (15°)
- Ricevitore di bordo percepisce passaggi successivi del pennello e calcola posizione
- PDME per distanza

68

Ingegneria Aerospaziale - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

MLS



69

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione

MLS: vantaggi

- Il pilota è più libero di decidere l'allineamento per l'atterraggio (militari)
- Possibilità di guida per elicotteri
- Back guidance per assistenza ad atterraggio abortito e decollo

70

Impianti Aerospaziali - Materiale didattico riservato agli studenti del corso - Vietata la riproduzione e la diffusione