

9.7 Fusione di sensori (filtraggio complementare)

Nel misurare una particolare variabile, un singolo tipo di sensore per quella variabile, potrebbe non essere capace di soddisfare a tutte le specifiche di prestazioni richieste. Qualora siano possibili diverse alternative di sensori, per la realizzazione di quella particolare misura, potremmo combinarne diversi all'interno di un unico sistema di misura, che utilizza le migliori qualità di ciascun singolo dispositivo. In altre parole, se un sensore di un certo tipo è in grado di soddisfare solo una parte dei requisiti, forse una tra le sue alternative può "colmare le sue lacune" in termini di prestazioni. Il secondo sensore è adatto per le specifiche nei confronti delle quali il primo sensore presenta delle mancanze, e viceversa. Quindi, **i due sensori risultano complementari l'un l'altro**, dando luogo a ciò che chiamiamo **filtraggio complementare**. Altri nomi vengono utilizzati per lo stesso concetto, come *aiding* o fusione di sensori (*sensor fusion*). Una versione più avanzata di un'idea simile è il cosiddetto *filtro di Kalman*. Il nostro primo esempio viene dall'area applicativa dei sistemi per veicoli spaziali⁴³, in particolare la misura dell'altitudine di un veicolo sopra il livello del mare. Merhav fornisce gli strumenti necessari per la nostra applicazione specifica e in più estende il concetto a situazioni più complicate, che includono una versione del filtro di Kalman.

⁴³ S. Merhav, "Aerospace Sensor Systems and Applications", Springer, New York, 1996, cap. 9.

Per anni la misura dell'altitudine di un aereo è stata effettuata utilizzando una misura di pressione statica, dal momento che l'altitudine sopra il livello del mare è correlata in maniera nota (vedi una sezione sull' "atmosfera standard" in un libro di meccanica dei fluidi) alla pressione statica. Nella discussione che stiamo per effettuare le variazioni di altitudine considerate sono sufficientemente piccole da poter trascurare qualsiasi effetto di tipo non lineare. La pressione statica, e quindi la "altitudine barometrica", vengono misurate con un qualsiasi sensore di pressione adatto allo scopo, che riceve in ingresso il segnale in pressione da un tratto di tubo proveniente dalla presa di pressione statica, posizionata sul tubo di pitot dell'aeroplano. (Tutti gli aeroplani e i missili hanno un tubo di pitot per la misura dell'altitudine e la velocità nell'aria.) La "buona" caratteristica di questo altrimetro barometrico consiste nel fatto che non esiste alcuna deriva di zero con il tempo. Le caratteristiche "cattive" sono che la risposta del circuito pneumatico è abbastanza **lenta** e c'è un notevole **rumore dovuto alla turbolenza**. Se il velivolo considerato richiede un segnale di altitudine veloce, privo di rumore, l'approccio barometrico può non essere opportuno. Uno schema alternativo per la misura dell'altitudine impiega un accelerometro orientato per misurare l'accelerazione verticale; si effettua una doppia integrazione di questo segnale per ottenere il segnale di altitudine. Questo approccio è accompagnato da una risposta **assai veloce** ed è **relativamente esente da rumore**. Tuttavia, anche il più piccolo errore di zero dell'accelerometro e/o nei circuiti integratori provocherà una **deriva di zero costantemente crescente**, che è **totalmente inaccettabile**. In aggiunta, per un volo livellato a una determinata altitudine, se il segnale stesso di altitudine accumulato all'uscita del secondo integratore dovesse essere perso per qualsiasi ragione, non esiste alcun modo di recuperare un valore di altitudine. Ci accorgiamo, dunque, che i due schemi per la misura dell'altitudine sono **complementari**; dove uno si comporta male, l'altro si comporta bene. Di conseguenza, **l'altrimetro baroinerziale**⁴⁴ viene utilizzato in numerosi aeromobili.

Nell'applicazione citata, il concetto di base, consistente nella combinazione dei segnali di due sensori di altitudine non è complicato; si avvale di comuni e ben noti filtri passa basso e passa alto, combinati in modo opportuno. Se un segnale tempo variante viene applicato contemporaneamente a un filtro passa basso $[1/(\tau s + 1)]$ e a un filtro passa alto $[\tau s/(\tau s + 1)]$, e se due segnali in uscita dai filtri vengono sommati, il segnale di uscita somma dei due è esattamente uguale al segnale di ingresso. Nel sistema altimetrico, inviamo il segnale di altitudine proveniente dall'accelerometro/integratore al filtro passa alto perché vogliamo cancellare la deriva a bassa frequenza del segnale. Il segnale di altitudine proveniente dal sensore di pressione statica e caratterizzato da rumore viene invece inviato al filtro passa basso per attenuare la porzione di segnale costituita da rumore ad alta frequenza. Desideriamo, in primo luogo, studiare la versione più semplice di un tale schema.

Si consideri un sistema che utilizza i filtri passa basso e passa alto, come appena descritto. Supponiamo che il segnale in ingresso al filtro passa basso sia costituito da un'onda triangolare di frequenza 0.1 Hz e ampiezza 30 m di altitudine, con un disturbo costituito da rumore di

ESSEMPIO
 ACCCELEROMETRO
 TUBO PITOT

MISURA
RIFERITA

SOLO
+ DIFFS

LEGNALI

⁴⁴ Ibid., p. 402; M. Kayton e W. R. Fried, "Avionics Navigation Systems", Wiley, New York, 1969, p. 317; M. Kayton e W. R. Fried, 2^a ed., 1997, p. 373.

NOTARE CAS;

$$\frac{1}{\tau s + 1} + \frac{\tau s}{\tau s + 1} = 1$$

CORRISPONDE ANCHE AD UNA MEOLA
POSTA NEL DOMINIO DI FOURIER

tipo
sura
vari
rati
rica

così
sen-
bas
atte
star
get
mo
par

La
vie

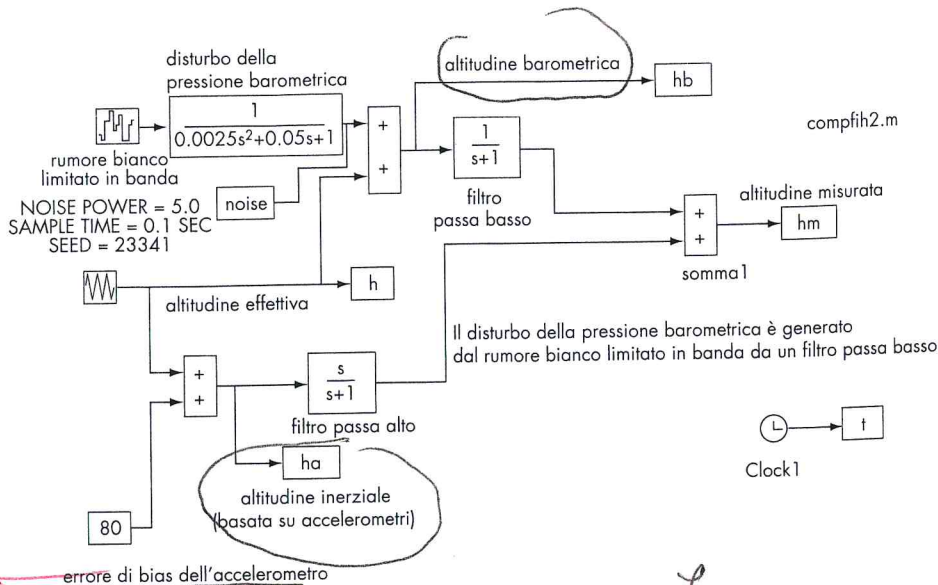


FIGURA 9.21 Sistema a fusione di sensori per la misura dell'altitudine con strumenti barometrici e inerziali.

NOTA: CONSI DERATO COSTANTE?

tipo random. Il segnale rappresenta una altitudine di aeroplano lentamente variabile, come misurata da un traduttore di pressione collegato alla presa statica di un tubo di pitot statico. La variazione di altitudine di ± 30 m avviene, naturalmente, intorno a una altitudine media operativa di, per esempio, 1500 m, e la parte casuale del segnale modella la turbolenza atmosferica che inevitabilmente viene avvertita dal tubo di pitot.

Supponiamo che il segnale di accelerazione, dopo doppia integrazione, contenga un errore costante di 25 m. La Figura 9.21 mostra un diagramma SIMULINK per il sistema a fusione di sensori che combina il segnale di altitudine barometrico e inerziale, utilizzando i filtri passa basso e passa alto. La costante di tempo τ del filtro passa basso viene scelta in modo tale da attenuare il rumore casuale atmosferico; in questo caso $\tau = 1.0$ è un valore adeguato. La costante di tempo del filtro passa alto deve essere la stessa, così non abbiamo alcuna libertà progettuale per obbligare il filtro passa alto a "cancellare" il bias più rapidamente. La Figura 9.22 mostra come il nostro sistema, su una base temporale piccola, non avverta l'errore di bias della parte inerziale e attenui il rumore atmosferico.

Il sistema appena studiato non è esattamente lo stesso di un altimetro baroinerziale reale. La principale differenza sta nel fatto che qualsiasi errore di bias costante nell'accelerometro viene integrato due volte, dal momento che l'uscita desiderata è la *posizione* verticale, e non

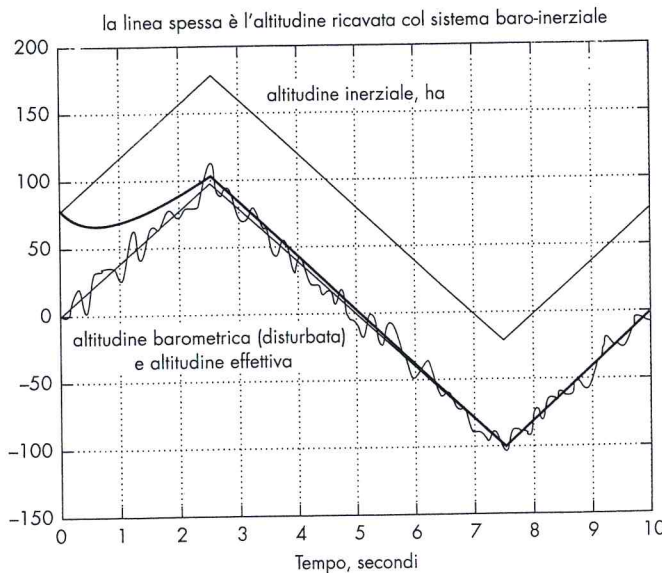
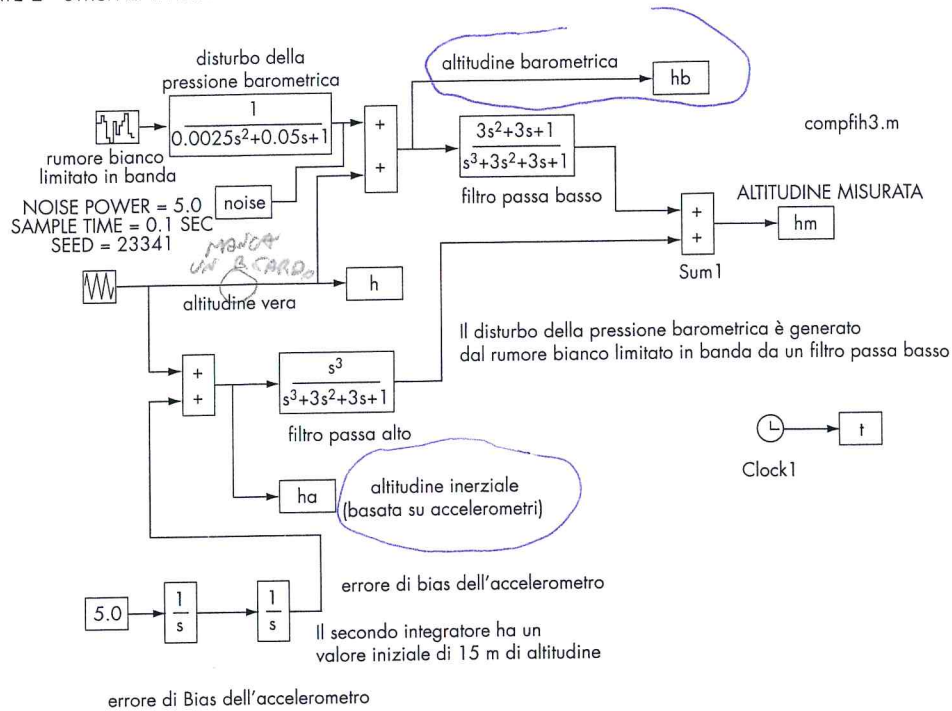


FIGURA 9.22 La fusione di sensori elimina il bias nel sistema inerziale e riduce il rumore atmosferico.

FIGURA 9.23
Altimetro baroinerziale più realistico.



l'accelerazione. La doppia integrazione di una costante fornisce una deriva di tipo parabolico, che *non* verrà cancellata dal nostro semplice filtro passa alto. Abbiamo la necessità di un filtro passa alto più "robusto". Possiamo mostrare matematicamente che un errore di bias costante sarà eliminato dalla presenza di un termine s nel numeratore del filtro, una deriva del tipo a rampa richiede un termine di tipo s^2 e una deriva parabolica richiede un termine di tipo s^3 . Il denominatore del filtro passa alto dovrà ora essere una polinomiale cubica, in modo che il filtro risulti fisicamente realizzabile. Eseguite queste operazioni, anche il filtro passa basso deve essere modificato, in modo da avere un numeratore di tipo quadratico e lo stesso denominatore cubico. La Figura 9.23 mostra il sistema con i nuovi filtri, e la Figura 9.24 mostra il comportamento risultante.

DIMOSTRAZ.

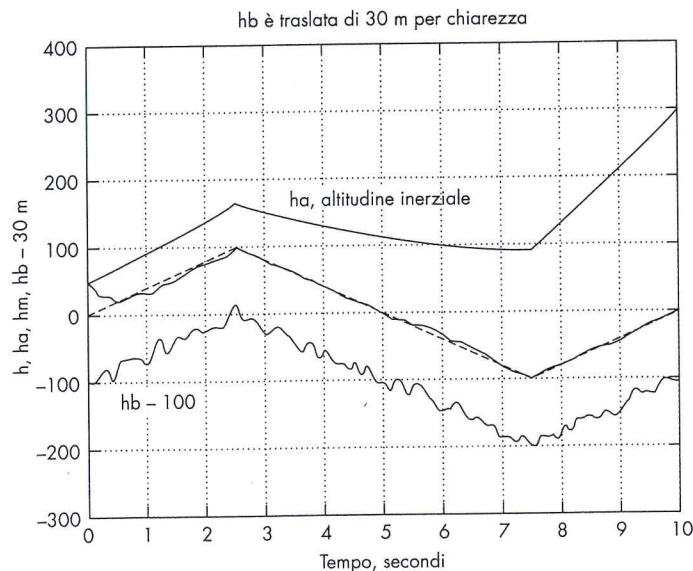


FIGURA 9.24
Risposta di un altimetro baroinerziale realistico.

Mis

L'alt
semi
disp
proc
stess
cale
esse
per
pref
tre

4, p
tipo
C12
met
incl
circ
una
una
duk
segi
tipi

velo
lizz
zero
pre:
non
può
ser
di v
din
fin
qui
zio
bile

stra
tra
ret
me
sor
ver
tiv
sch
zio
le:
me
go
L'e
me
pri
ru
zio