

zione di media o di « smoothing » sull'immagine: partendo da un angolo di essa viene calcolato il valore medio di luminosità su una finestra di  $m \times n$  pixel (ad es.  $2 \times 2$ ) e quindi a ciascun pixel della finestra viene assegnato tale valore medio; tale operazione viene ovviamente ripetuta per righe o per colonne su tutte le matrici  $m \times n$  in cui è stata suddivisa l'immagine. Questa elaborazione può essere utilmente impiegata per ridurre il rumore introdotto dai circuiti di digitalizzazione, oppure per evidenziare i valori medi di luminosità dell'immagine.

Una delle caratteristiche principali di un'immagine digitale è un parametro chiamato « frequenza spaziale », che molto genericamente può essere definito come il numero delle variazioni di grigio per unità di misura (mm, cm o m). Similmente al caso di un segnale monodimensionale, anche nel campo bidimensionale è possibile determinare lo spettro di una immagine e cioè il suo contenuto di alte e basse frequenze spaziali. L'insieme di tecniche con le quali è possibile agire sullo spettro di un'immagine rientrano nel campo del filtraggio spaziale; con queste è possibile effettuare operazioni di correzione, di riduzione di componenti di rumore, di esaltazione del contrasto e di ricostruzione (« restoration ») di immagini degradate dalla presenza di svariati tipi di rumore. Tali tecniche di filtraggio rappresentano una delle più utili forme di pre-elaborazione prima di sottoporre l'immagine a successive elaborazioni quali ad esempio compressione dati, riduzione di ridondanza e riconoscimento di configurazioni.

Un'immagine che per esempio venisse elaborata in modo da esaltare le basse frequenze spaziali ed attenuare le alte risulta in genere con poco contrasto, in quanto il contrasto è dato dalle brusche variazioni di luminosità e cioè dalle alte frequenze; una tale elaborazione avrebbe però il pregio, se opportunamente dosata, di eliminare le alte frequenze spaziali di rumore presenti e quindi di migliorare in alcuni casi la qualità dell'immagine.

Uno dei metodi più semplici per effettuare un filtraggio passa-basso consiste nell'assegnare a ciascun pixel dell'immagine il valore ottenuto dalla media dei valori degli otto pixel adiacenti a quello in considerazione. Questo ha l'effetto di diminuire il rumore puntiforme presente nell'immagine. Inoltre, poiché una immagine contiene in certe proporzioni frequenze spaziali alte e basse, se a ciascun pixel dell'originale viene sottratto il livello di grigio del corrispondente pixel dell'immagine elaborata con un filtro passa-basso, come precedentemente descritto, si ottiene un annullamento delle frequenze basse e quindi l'effetto di un filtro passa-alto. Nel caso che l'originale abbia uno scarso contenuto di alte frequenze di rumore, questo tipo di filtraggio produce un ottimo effetto di esaltazione del contrasto.

Ben più complicate, ma ovviamente anche più efficaci, risultano le elaborazioni di filtraggio numerico basate sulle trasformate di Fourier. In questo campo la teoria è stata sviluppata ampiamente.

Poiché un'immagine può essere considerata come un segnale bidimensionale, la trasformata di Fourier può essere applicata anche ad un'immagine per ottenere una serie di « frequenze spaziali » (in ampiezze e

fasi), il cui andamento indica quanto rapidamente la luminosità varia da un pixel a quello successivo. I coefficienti di Fourier definiscono l'ampiezza di queste componenti sinusoidali e cosinusoidali a due dimensioni.

In breve, una tecnica di elaborazione consiste nel trasformare secondo Fourier i dati che rappresentano l'immagine, modificare i coefficienti in maniera opportuna ed infine generare una nuova immagine nel dominio dello spazio, per mezzo di una trasformata inversa di Fourier.

In fig. 12 e fig. 13 sono riportati due esempi di filtraggio rispettivamente passa-basso e passa-alto, effettuati sull'immagine di fig. 11 scelta come originale. Sulla destra dei due filtri è possibile notare l'andamento della risposta in frequenza dei due tipi di filtro impiegati.

Uno degli argomenti dell'elaborazione delle immagini che ha ormai assunto una notevole importanza per una grande quantità di applicazioni è quello della « restoration »; con questo termine si intende l'insieme di tecniche e metodi utilizzati per correggere, anche parzialmente, le degradazioni presenti nell'immagine in esame, dovute alla presenza di rumore di vario tipo, aggiunto nelle varie fasi di acquisizione, campionamento, quantizzazione, codifica, trasmissione e rivelazione.

Una delle tecniche di ricostruzione dell'immagine più impiegate è quella che fa uso appunto di filtri numerici bidimensionali.

È da notare che il successo nella ricostruzione dell'immagine degradata è possibile solo se è disponibile una accurata descrizione matematica del difetto; se manca questa premessa, l'elaborazione con il calcolatore porta a risultati non sempre validi.

Consideriamo ad esempio la degradazione di una immagine dovuta a sfuocamento per cui un punto si espande su quelli adiacenti: tale difetto viene descritto da una opportuna funzione matematica detta di « diffusione » o di « trasferimento ottico » del sistema di lenti impiegato. Se tale funzione è nota, il rifuocamento avviene moltiplicando la trasformata di Fourier dell'immagine sfuocata per il reciproco della funzione di trasferimento ottico del sistema di lenti fuori fuoco utilizzato. Ne risulta una rappresentazione di Fourier nitida dell'immagine.

A titolo di esempio, in fig. 14 sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione del filtro « inverso » e « parabolico », particolarmente efficaci nel caso di sfuocamento dell'immagine (in particolare per filtro

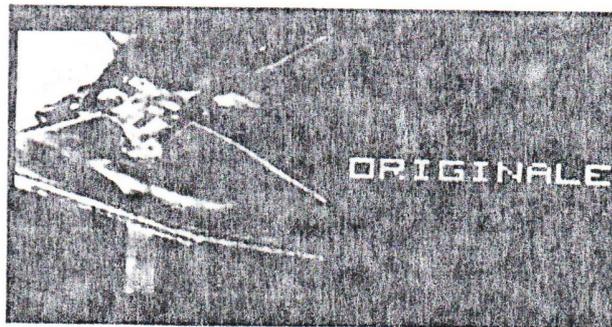


Fig. 11 - Acquisizione di immagine del territorio (ripresa da aereo in Maremma).

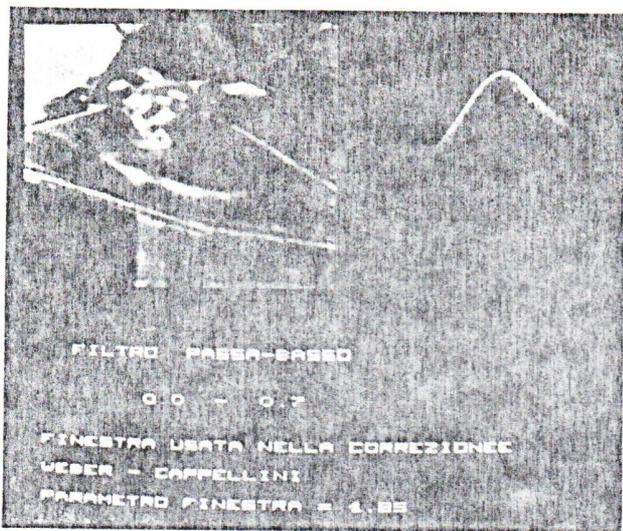


Fig. 12 - Elaborazione con filtro numerico bidimensionale del tipo FIR passa-basso progettato con funzione finestra (risposta in frequenza a destra) della immagine di fig. 11.

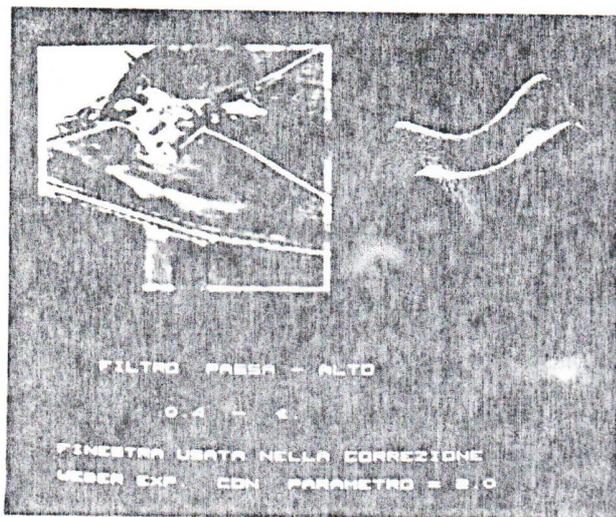


Fig. 13 - Elaborazione con filtro numerico bidimensionale del tipo FIR passa-alto progettato con funzione finestra (risposta in frequenza a destra) della immagine di fig. 11.

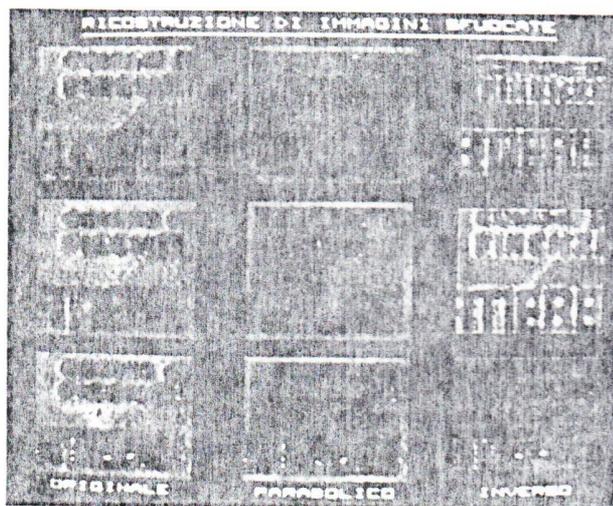


Fig. 14 - Ricostruzione di immagini sfuocate con filtri numerici bidimensionali FIR di tipo «inverso» e «parabolico».

parabolico si intende un filtro la cui risposta in frequenza è un paraboloido di rivoluzione).

I risultati, di cui la riproduzione peggiora notevolmente l'effetto, sono già notevoli e richiedono un tempo di elaborazione che, se pur variabile a seconda della finestra adottata, rimane sempre in limiti accettabili.

È possibile un successivo miglioramento, sia per quanto riguarda la determinazione e descrizione della causa dello sfuocamento, sia per il tempo di elaborazione.

### 5. Esempi di analisi territoriale

Una delle applicazioni più interessanti dell'elaborazione numerica delle immagini è senza dubbio quella del telerilevamento: i problemi connessi allo sfruttamento delle risorse terrestri, che sempre più stanno rivelando i loro limiti, hanno fatto sviluppare le ricerche sull'ambiente esistente nel nostro pianeta, nel tentativo di trovare nuovi metodi di utilizzazione e gestione tali da non degradarlo irreversibilmente.

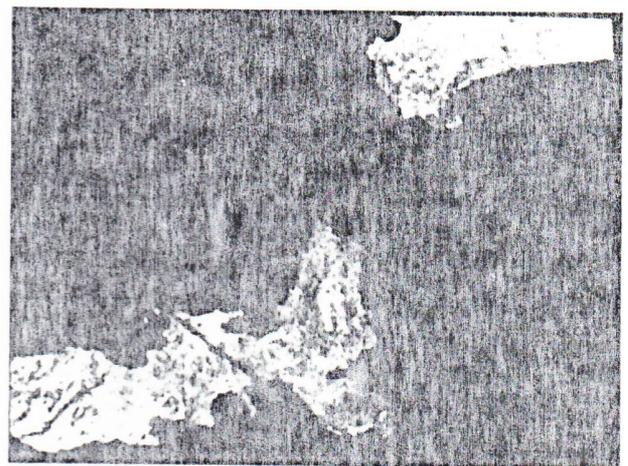


Fig. 15 - Immagine Landsat (banda MSS 4) relativa all'isola d'Elba.

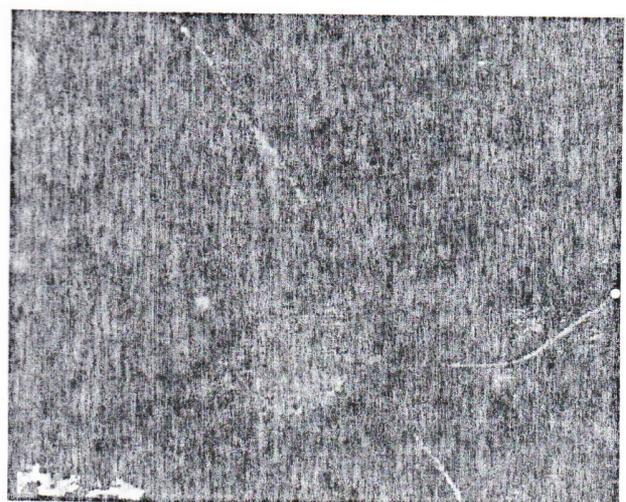


Fig. 16 - Immagine Landsat (banda MSS 6) relativa alla costa tirrenica in vicinanza dell'Arno (si vede il «pennacchio» della Bocca d'Arno).

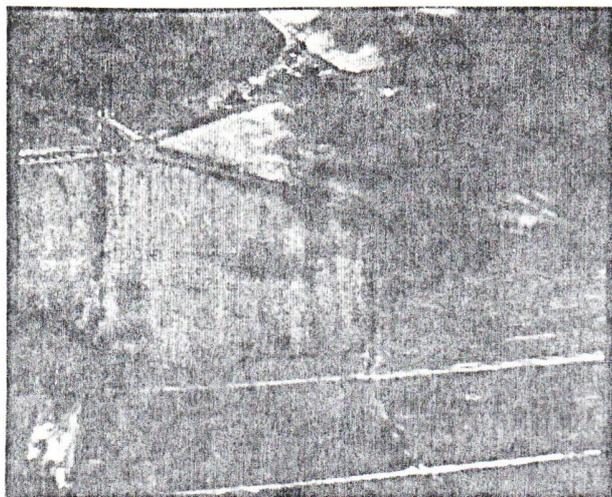


Fig. 17 - Immagine nella banda del visibile ripresa da aereo in Maremma.

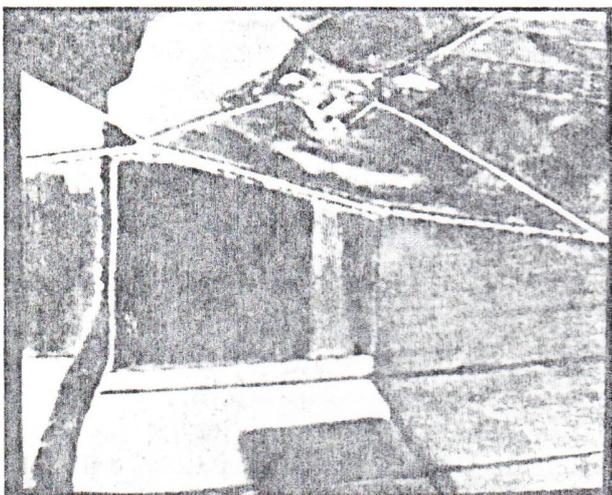


Fig. 18 - Immagine nell'infrarosso ripresa da aereo in Maremma.

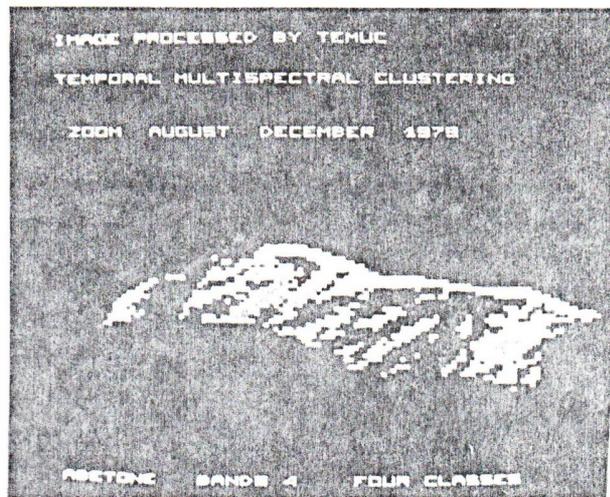


Fig. 19 - Esempio di classificazione (4 classi) sulla foresta dell'Abetone, utilizzando immagini Landsat dell'agosto e dicembre 1979.

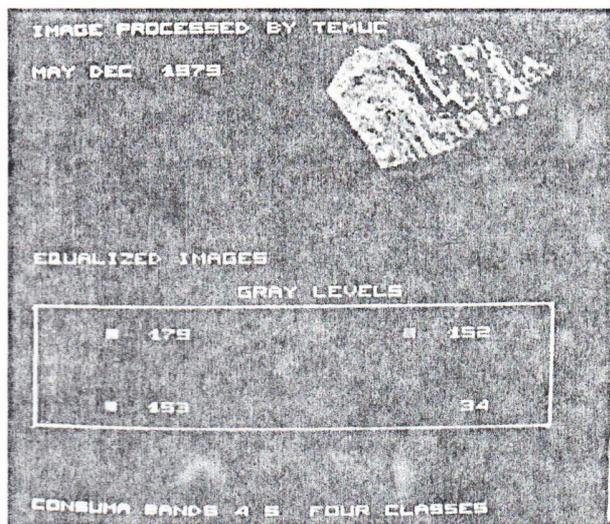


Fig. 20 - Esempio di classificazione (4 classi) sulla foresta di Vallombrosa, utilizzando immagini Landsat (bande MSS 4 e 5) del maggio e dicembre 1979.

Oltre ai rilevamenti locali, adatti per studi particolari, a fianco del rilevamento aereo si è ormai validamente affermato l'uso del satellite, capace di osservare larghe zone di territorio con periodi di ripetizione regolari e punto di osservazione praticamente costante. La risoluzione a terra dei sensori installati su di essi, pur non essendo ottima, è già sufficiente per studi di fenomeni a scala media e grande ed è suscettibile di miglioramenti in tempi molto brevi.

Si riportano di seguito alcuni risultati di algoritmi implementati sul sistema citato all'inizio, rivolti a finalità dettate dalle considerazioni brevemente esposte.

Nelle fig. 15 ÷ 18 sono mostrate alcune immagini originali, cioè così come compaiono dalla lettura dei nastri magnetici che vengono distribuiti dagli Enti preposti alla loro vendita. Le prime si riferiscono a nastri Landsat, banda MSS 4 (Isola d'Elba) e banda MSS 6 (Bocca d'Arno); in questa è evidente il « pennacchio » formato dai detriti trasportati dall'Arno. Le altre immagini (fig. 17 e 18) riguardano invece

un volo aereo compiuto sulla zona della Maremma, nelle bande del visibile e dell'infrarosso. Le elaborazioni compiute su queste immagini sono rivolte essenzialmente allo scopo di ottenere un inventario delle risorse esistenti ed alla successiva realizzazione di modelli matematici in cui compaiono tutti gli elementi che possono influenzare la produzione agricola e forestale, compresi quelli economici ed ecologici; la finalità è quella di fornire una indicazione di quello che potrebbe essere il migliore impiego pratico della porzione di territorio in esame.

Un esempio di questa classificazione è mostrato in fig. 19 l'esperienza è stata condotta sulla foresta dell'Abetone, riuscendo a separare con buona precisione le varie specie arboree; la bontà del risultato è stata verificata mediante il confronto con dati rilevati a terra. Un ulteriore esempio è mostrato in fig. 20, che riguarda la foresta di Vallombrosa e dove la classificazione è stata condotta utilizzando non solo dati multitemporali ma anche multispettrali (bande MSS 4 e 5).

## Bibliografia

- [1] Pratt W.K. - *Digital image processing* - John Wiley & Sons, New York, 1978.
- [2] Rosenfeld A. - *Picture processing by computer* - Academic Press, New York, London, 1969.
- [3] Cannon T.M., Hunt B.R. - *Image processing by computer* - Scientific American, vol. 245, n. 4, ottobre 1981.
- [4] Bernstein R. - *Digital image processing for remote sensing* - IEEE Press, 1978.
- [5] Tonelli A.M. - *Misurare l'ambiente* - Zanichelli Bologna, 1979.
- [6] Cappellini V., Constantinides A.G., Emiliani P. - *Digital filters and their applications* - Academic Press Inc., Ltd, London-New York, 1978.
- [7] Hunt B.R. - *Digital image processing* - Proc. IEEE, vol. 63, n. 4, apr. 1975, pag. 693-708.
- [8] Andrews H.C., Hunt B.R. - *Digital image restoration* - Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1977.
- [9] Cappellini V., Giovani M. - *Alcune tecniche di filtraggio numerico 2-D per l'elaborazione e la ricostruzione di immagini* - Istituto di Elettronica, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Firenze, Rapp. int. R3-83, 1982.
- [10] Cappellini V. - *Image enhancement by local Operators and two-dimensional filtering* - Intern. Workshop on Image Processing in Astronomy, Miramare-Trieste, Italy, June 1979.
- [11] Robinson G.S. - *Detection and coding of edges using directional masks* - University of Southern California, Los Angeles, USC-IPL, Report 660, March 1976.
- [12] Cappellini V. - *Elaborazione numerica dei segnali e delle immagini* - Ed. Boringhieri, Torino, in c.d.s.