

Radar a visione laterale per il rilevamento topografico

Un'antenna radar installata sotto la fusoliera di un aereo e orientata lateralmente consente di riprendere dettagliate immagini del terreno, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche e di illuminazione

di Homer Jensen, L.C. Graham, Leonard J. Porcello ed Emmett N. Leith

Le prime immagini aeree della superficie terrestre, riprese per scopi di rappresentazione topografica e di ricognizione militare, sono state alcune grossolane fotografie scattate da aerostati verso la metà del XIX secolo. Con il perfezionamento delle macchine fotografiche, delle pellicole e degli aeromobili, la ripresa aerea è stata via via impiegata per soddisfare una crescente varietà di esigenze. Negli anni venti le fotografie verticali eseguite da aeroplani hanno costituito la base della fotogrammetria aerea. Al giorno d'oggi quasi tutte le carte geologiche e topografiche sono basate su immagini riprese da aerei e da satelliti artificiali.

Negli anni cinquanta sono stati inventati dei dispositivi da ripresa la cui sensibilità si estendeva oltre la regione visibile dello spettro, in particolare nell'infrarosso. Con l'introduzione di sensori all'infrarosso la regione dello spettro elettromagnetico entro la quale era possibile osservare la superficie della Terra risultava compresa fra 0,4 micrometri (la più corta lunghezza d'onda visibile) e 10 micrometri (nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso termico). Tutti i dispositivi rivelavano, in funzione della temperatura e dell'emissività, l'energia costituita da luce solare riflessa dal terreno e dalle strutture costruite dall'uomo o emessa sotto forma di radiazione naturale.

Tuttavia alle lunghezze d'onda della luce visibile e dell'infrarosso l'atmosfera, anche quando è limpida, assorbe una frazione notevole delle radiazioni. La presenza di nubi o di pioggia limita fortemente le prestazioni dei sensori. Pur avendo a disposizione una così ampia regione dello spettro l'aerotopografo continuava a vedere inappagato il suo vecchio desiderio di qualche magica macchina da presa in grado di funzionare dall'alto per riprendere immagini della superficie terrestre indipendentemente dalle condizioni meteorologiche e di luce.

In fondo i requisiti di un sistema da ripresa di questo genere sono semplici. Per essere indipendente dalla luce solare esso deve possedere una sorgente propria di illuminazione e per penetrare attraverso le nubi deve impiegare un tipo di radiazione che non venga attenuato o diffuso dal vapor d'acqua. Sistemi simili, che soddisfano entrambi i requisiti, esistono e sono i sistemi radar a microonde, con lunghezze d'onda comprese fra uno e 30 centimetri.

Le apparecchiature radar sono dotate di un proprio sistema di illuminazione e le microonde, almeno per certe gamme di frequenza, sono poco sensibili alla trasparenza dell'atmosfera e alle condizioni meteorologiche. I sistemi radar operanti a queste frequenze seguono l'evoluzione delle condizioni del tempo da

terra e dai satelliti, sono impiegati nel controllo del traffico aereo e sono stati utilizzati per misurare la distanza della Luna e dei pianeti. Le microonde, sebbene abbiano una lunghezza circa 100 000 volte maggiore delle radiazioni visibili, sono ancora abbastanza corte da assicurare una risoluzione sufficientemente fine per la maggior parte degli impieghi in geologia e in geografia. In effetti, un radar operante su quelle frequenze installato a bordo di un aereo elabora immagini della superficie terrestre con un eccellente dettaglio e un rilievo sorprendente. Nel seguito, ci limiteremo ai sistemi radar di bordo che forniscono immagini del terreno sottostante mediante antenne orientate verso un lato del velivolo, i cosiddetti radar a visione laterale (*side-looking radar*).

Il potere risolutivo del sistema

È ovvio chiedersi perché l'antenna di un radar siffatto debba essere orientata lateralmente. Quasi tutti conoscono i sistemi radar a scansione circolare, che presentano sullo schermo di un tubo a raggi catodici un'immagine ottenuta con l'ausilio di un'antenna rotante. Un sistema del genere, per esempio, è impiegato per i bollettini meteorologici televisivi e serve a localizzare le precipitazioni nella zona illuminata dall'antenna. In un radar a scansione circolare la traccia del tubo a raggi catodici ruota in sincronismo con l'antenna e l'intensità variabile dell'energia riflessa viene espressa dalle variazioni di luminosità del raggio di elettroni che forma la traccia. L'immagine della traccia persiste per un certo tempo sullo schermo del tubo e quindi viene mantenuta con continuità.

L'esperienza ha dimostrato che la maggior parte delle immagini ottenute con sistemi radar di bordo a scansione circolare hanno una definizione modesta. La limitazione del potere risolutivo dipende soprattutto dal fatto che la maggior par-

Le immagini riprese con un radar a visione laterale, ossia un radar dotato di antenna orientata verso un lato del velivolo, mostrano in nitido rilievo il terreno di un'isola dell'arcipelago indonesiano. Come si rileva dalle ombre, l'aeroplano da cui è stata effettuata la ripresa, seguiva una rotta parallela alla dimensione maggiore delle immagini, che rappresentano una zona della lunghezza di 40 chilometri lungo la costa meridionale dell'isola di Flores. Il rilievo a sinistra è un vulcano attivo dell'altitudine di 2130 metri e quello a destra è un vulcano inattivo della stessa altitudine. L'angolo radente con cui sono prese le immagini da un radar a visione laterale consente di distinguere anche i crateri vulcanici più piccoli al centro della figura e la serie di netti rilievi e vallate in vicinanza della costa. Le tre figure sono ricavate dalla stessa immagine radar del terreno; i loro colori sono differenti perché ciascuna è generata e presentata usando luce monocromatica di diversa lunghezza d'onda. Tuttavia ogni immagine presenta più di un colore perché in certe zone la luce monocromatica era abbastanza intensa da impressionare un secondo strato dell'emulsione sensibile al colore nella pellicola. La presentazione a colori delle immagini radar fornisce maggiore quantità di informazioni che non una presentazione in bianco e nero.

te delle antenne radar di bordo a scansione circolare sono relativamente piccole, mentre si può ottenere una buona risoluzione angolare solo se l'apertura del sistema è molto grande rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione. In altre parole ciò significa che il potere risolutivo di un obiettivo o di un'antenna di grande apertura è maggiore di quello di un obiettivo o di un'antenna di piccola apertura. La limitazione del potere risolutivo angolare è proporzionale al rapporto fra la lunghezza d'onda e la dimensione dell'apertura. A bordo di un aereo è difficile montare un'antenna rotante di grandi dimensioni, mentre è facile installarne sotto il ventre una fissa di lunghezza fino a cinque metri e orientata lateralmente.

Un sistema radar a visione laterale produce immagini sfruttando le proprietà riflettenti del terreno alle lunghezze d'onda centimetriche. Le immagini, raccolte su pellicola fotografica, assomigliano a normali fotografie aeree, malgrado alcune differenze fondamentali. In una fotografia aerea la sorgente di illuminazione del suolo è il Sole, diversamente dal caso del radar in cui è l'antenna che costruisce l'immagine sfruttando l'energia da essa stessa irradiata. Poiché le onde radar si propagano in linea retta, le zone poste in ombra da rilievi o da altri elementi a sviluppo verticale non vengono illuminate e quindi non ricevono né riflettono gli impulsi a microonde. Le ombre che ne risultano sull'immagine radar del terreno sono dei vuoti scuri e non zone debolmente illuminate dalla dispersione atmosferica, come si verifica nel caso di ombre su un terreno accidentato fotografato a luce radente (all'alba o al tramonto del Sole). Sull'immagine radar le caratteristiche di dettaglio delle riflessioni sono determinate dalla lunghezza d'onda, dalla polarizzazione del segnale incidente e dalle proprietà geometriche ed elettriche di ciascuna superficie riflettente sul terreno. Qui prenderemo in considerazione solo la lunghezza d'onda del segnale e le proprietà geometriche del terreno.

Geometria e riflessione

È il rapporto fra la lunghezza dell'onda elettromagnetica e le dimensioni delle irregolarità del terreno a determinare se la superficie stessa appare accidentata o liscia. Così una superficie che appare accidentata a una lunghezza d'onda di 0,5 micrometri, che si trova nella regione visibile, può risultare quasi levigata a una lunghezza d'onda di tre centimetri. Una superficie accidentata diffonde l'energia incidente in tutte le direzioni, restituendone solo una piccola frazione all'antenna, mentre una superficie piana riflette l'energia incidente in una sola direzione, agendo come uno specchio. L'energia che ritorna all'antenna è molto forte se la superficie piana è normale al raggio radar incidente e nulla per qualsiasi altro angolo di incidenza. Alcuni tipi di superfici, per esempio un campo di frumento, si comportano come riflet-

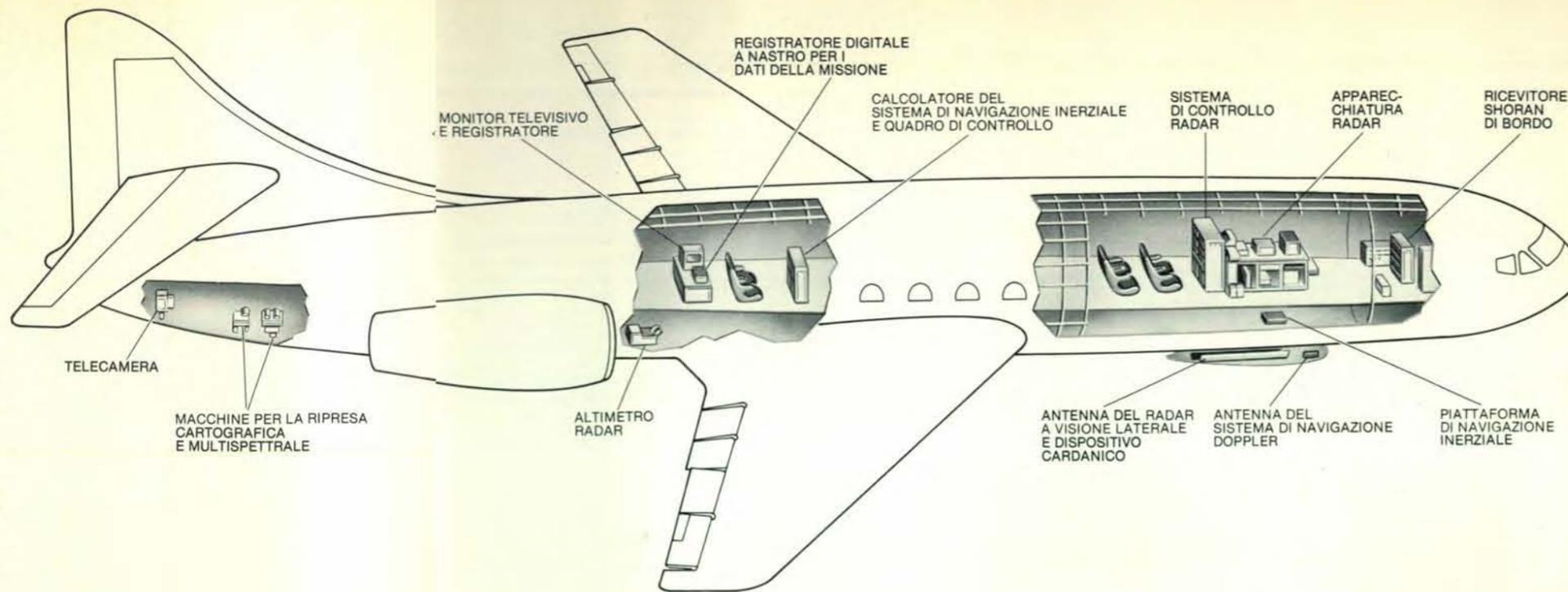
tori diffondenti alle frequenze della luce visibile e delle microonde e altri, come un parcheggio pavimentato in cemento, si comportano come riflettori diffondenti alla luce visibile e come riflettori speculari alle microonde. Dalle considerazioni precedenti si conclude che esistono più riflettori speculari per le microonde che per la luce visibile.

Le zone ricoperte da acqua sono riflettori speculari per eccellenza e, poiché non sono in genere viste sotto un angolo retto dall'antenna radar, riflettono specularmente tutta l'energia a microonde nello spazio circostante senza rinviare alcuna frazione all'illuminatore. Di conseguenza nelle immagini di un radar a visione laterale i fiumi e i laghi appaiono di solito completamente neri. Al contrario superfici verticali e orizzontali adiacenti (come un fabbricato in prossimità di una strada) possono comportarsi come un riflettore angolare, rinviando una gran parte dell'energia all'antenna. Superfici del genere possono quindi apparire al ricevitore radar migliaia di volte più brillanti di superfici diffondenti aventi dimensioni analoghe. Le città e gli agglomerati urbani, alle lunghezze d'onda delle microonde, presentano numerosi riflettori multipli di questo genere.

La geometria di un'immagine fotografica è determinata dal fatto che le relazioni angolari dei raggi, provenienti da un oggetto o da una scena, che raggiungono l'obiettivo vengono conservate nei raggi che, attraverso l'obiettivo, vanno a impressionare la pellicola e, in realtà, si comportano come se provenissero tutti dallo stesso punto (fuoco). La dimensione dell'immagine di un oggetto distante è inversamente proporzionale alla distanza dell'oggetto dall'obiettivo. I rapporti geometrici fra gli oggetti situati nel piano oggetto davanti all'obiettivo vengono conservati nel piano immagine parallelo, situato dietro alla lente; le reazioni fra le superfici inclinate rispetto al piano oggetto obbediscono, nel piano immagine, a semplici relazioni trigonometriche.

Un radar di bordo a visione laterale funziona in base a un differente insieme di considerazioni geometriche. Una delle coordinate dell'immagine formata da un sistema del genere viene stabilita dalla misura della distanza mediante gli impulsi radar in direzione perpendicolare alla rotta; l'altra coordinata viene stabilita dal movimento del velivolo, su cui il radar è installato, in direzione parallela alla rotta. Per il processo telemetrico un breve impulso di energia a microonde viene emesso da un trasmettitore di alta potenza tramite una lunga antenna montata sotto il ventre dell'aereo. L'antenna, orientata in direzione perpendicolare alla traiettoria di volo, ha un diagramma di irradiazione a ventaglio verticale. L'impulso si propaga alla velocità della luce; il tempo occorrente perché raggiunga un oggetto e ritorni indietro è proporzionale alla distanza fra l'oggetto e il velivolo, in direzione perpendicolare alla traiettoria di volo di quest'ultimo.

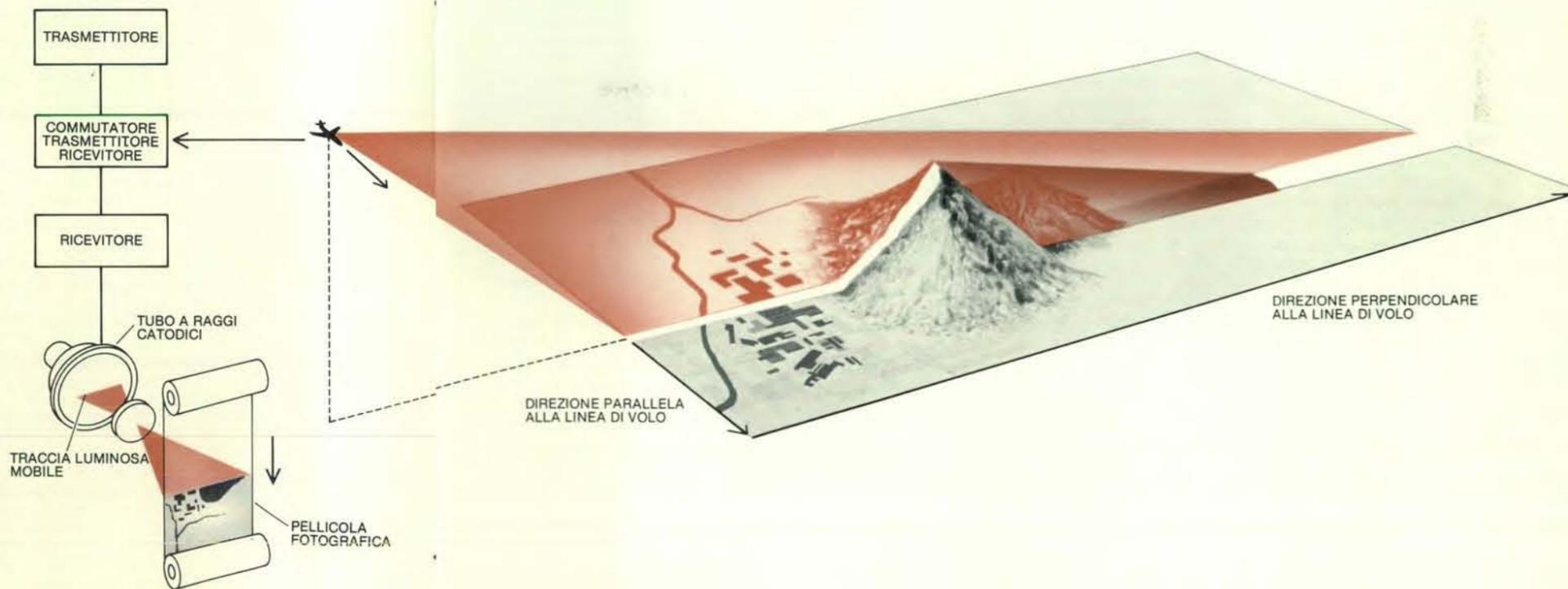
L'intensità del segnale d'eco controlla



Questo sistema radar a visione laterale costruito dalla Goodyear Aerospace Corporation è stato installato a bordo di un Caravelle della

Aero Service Division della Western Geophysical Company of America. L'aereo è mantenuto in rotta da un sistema di navigazione inerziale opportunamente programmato, che controlla anche molti param-

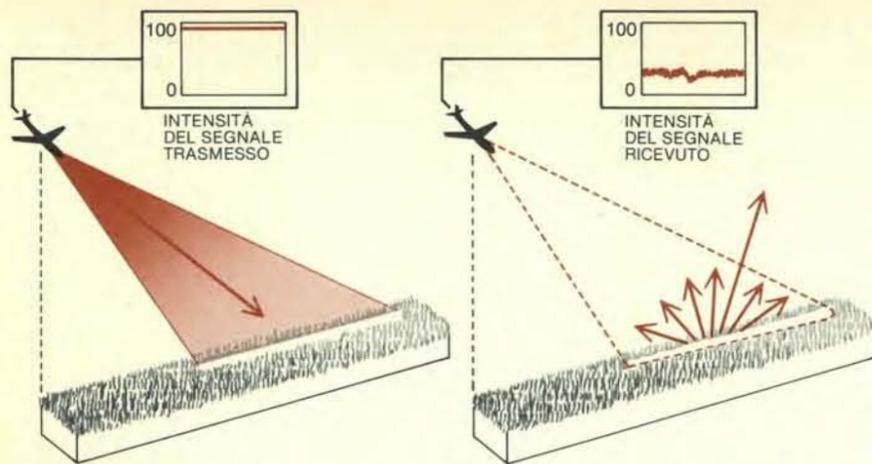
etri del radar. Altre macchine da presa di bordo (televise, cartografiche e multispettrali) forniscono una rilevazione complementare del terreno a lunghezze d'onda nella luce visibile e nell'infrarosso.



Schema del funzionamento di un radar a visione laterale nel caso di un aereo che rileva un terreno montuoso. L'antenna sotto il velivolo invia brevi impulsi di energia a microonde in uno stretto fascio perpendicolare alla li-

nea di volo. L'impulso, quando colpisce il terreno, viene diffuso in tutte le direzioni: una frazione dell'energia viene riflessa verso l'aereo dove è ricevuta dalla stessa antenna e inviata a un ricevitore. Nel ricevitore si crea un segnale, la cui ampiezza dipende dal livello energetico dell'eco ricevuta. Il segnale controlla la luminosità di una

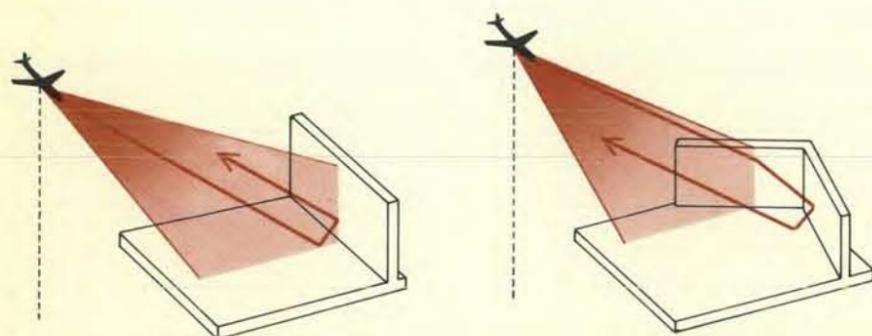
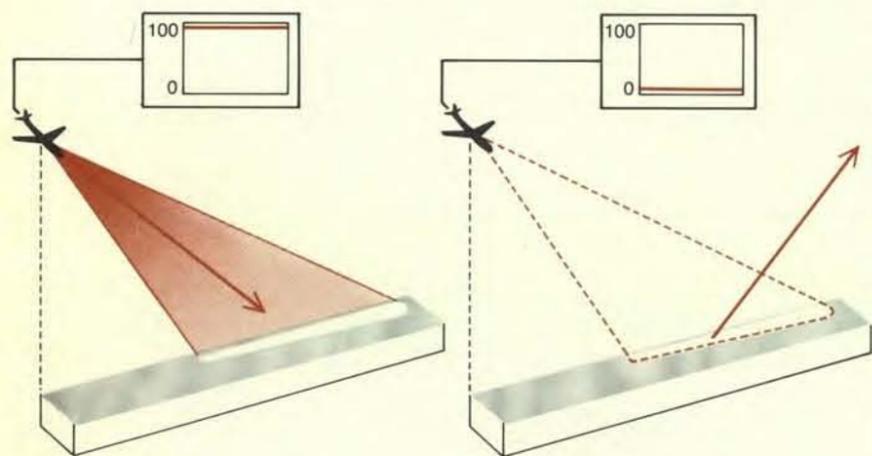
traccia luminosa mobile in un tubo a raggi catodici, la quale è registrata su una striscia di pellicola fotografica in movimento. Poiché le microonde si propagano in linea retta, le zone come la parete non illuminata della montagna non ricevono né riflettono gli impulsi e nell'immagine radar appaiono quindi come zone vuote in nero.



Riflettori diffondenti, per esempio un campo di frumento, diffondono l'energia degli impulsi a microonde in tutte le direzioni rinviandone solo una piccola frazione all'antenna radar.

L'intensità del punto luminoso che si muove sul tubo a raggi catodici, con una velocità sincronizzata in modo tale che successive posizioni del punto corrispondono a distanze successive dalla rotta. In questo modo ogni impulso emesso

dal trasmettitore radar traccia una linea di intensità variabile sul tubo a raggi catodici. La serie di tali linee, sovrapposte una sull'altra, impressiona una pellicola fotografica che si muove ad angolo retto rispetto alle linee di scansione



Un riflettore speculare, come una zona ricoperta da acqua o una superficie pavimentata, si comporta come uno specchio e riflette l'energia dell'impulso a microonde in una direzione ben definita. Se la superficie non è normale alla congiungente con l'antenna (*in alto*), non vi è ritorno di energia e la superficie sull'immagine risulta nera. Superfici verticali e orizzontali adiacenti (per esempio un fabbricato situato in prossimità di una strada) costituiscono invece dei riflettori angolari (*in basso*), i quali rimandano all'antenna un segnale di forte intensità.

con una velocità proporzionale alla velocità del velivolo. In questo modo si crea sulla pellicola un'immagine continua del terreno linea per linea.

Nell'immagine i dettagli di un rilievo sul terreno sono spostati rispetto alla posizione che avrebbero in direzione normale alla traiettoria di volo in una vista perpendicolare. Ciò si verifica perché la parte dell'impulso a microonde riflessa dalle zone di maggior altitudine, che si trovano più vicine all'aereo, raggiungono l'antenna prima dell'eco riflessa dal terreno circostante di minore altitudine. Le immagini delle zone sopraelevate più vicine al velivolo risultano pertanto spostate verso la traiettoria di volo. Tale fenomeno si riscontra in tutte le immagini di terreni accidentati ed è in qualche modo analogo alla distorsione prospettica nella fotografia convenzionale. In fotografia tutti gli oggetti con le stesse coordinate angolari rispetto all'obiettivo appaiono coincidenti. Nelle immagini radar risultano coincidenti tutti gli oggetti che in una scansione hanno la stessa distanza. Un'immagine radar è quindi approssimativamente analoga a un'immagine fotografica presa con una macchina ipotetica perpendicolare alla linea congiungente l'oggetto con l'antenna radar.

La velocità del velivolo lungo la rotta è molto bassa rispetto alla velocità di propagazione dell'impulso radar, mentre il fascio a ventaglio della radiazione a microonde risulta sempre orientato in direzione normale alla linea di volo. Ne consegue che mentre la dimensione perpendicolare alla rotta ha una prospettiva radar normale (le immagini degli oggetti, cioè, sono tanto più spostate verso l'aeromobile quanto maggiore è la loro altitudine), la dimensione parallela alla rotta manca del tutto di prospettiva. Quindi la scala e l'aspetto dell'immagine radar lungo la dimensione perpendicolare alla rotta sono determinati dalla velocità della luce mentre la scala e l'aspetto lungo l'altra dimensione sono determinati dalla velocità del mezzo aereo. Far concordare le due scale indipendenti ed equipararle sull'immagine finale costituisce uno dei problemi più eleganti e impegnativi nell'esecuzione dei rilevamenti radar della superficie terrestre.

In pratica questo e molti altri problemi complessi, che interessano la produzione di una buona immagine radar, sono stati risolti con l'installazione a bordo del velivolo di un sistema di navigazione inerziale. Questo impiega un calcolatore flessibile, programmato in modo da fornire uscite a sussidio della grande varietà di informazioni e di controlli occorrenti per il rilevamento radar. Il sistema di navigazione inerziale guida il velivolo a un'opportuna quota di esercizio lungo una serie di linee di volo che possono raggiungere lunghezze fino a 1000 chilometri; ogni rotta è quasi sempre esattamente parallela a quella adiacente in modo da poter comporre un buon mosaico del terreno. Il sistema inerziale guida l'aereo sopra o attraverso le nubi di giorno e di notte, senza necessità di correzioni da parte delle

assistenze visive o radio alla navigazione.

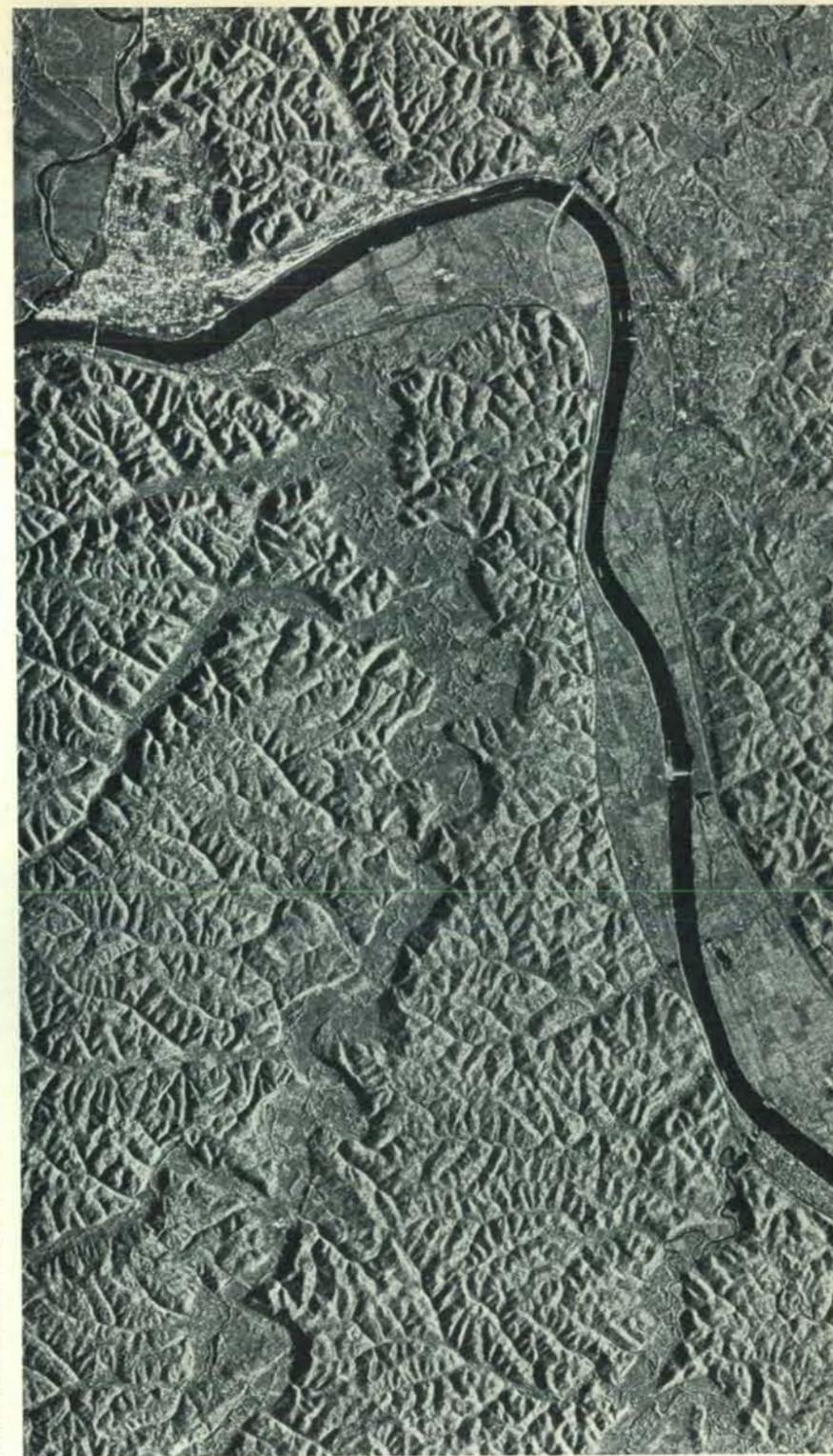
Il sistema di navigazione inerziale, con segnali inviati all'autopilota, mantiene l'aereo sulla rotta corretta senza manovre irregolari che introdurrebbero distorsioni nell'immagine. Inoltre i sensori angolari del sistema inerziale controllano l'assetto dell'antenna radar secondo tre coordinate angolari (imbarcata, rollio e beccheggio) assicurando il puntamento dell'antenna verso il suolo con un angolo costante rispetto alla linea di volo. Il dato di velocità in uscita dal sistema inerziale regola sia il numero di impulsi al secondo emessi dal radar sia la velocità di avanzamento della pellicola che registra le immagini. La velocità di scansione dello schermo del tubo a raggi catodici da parte del punto luminoso stabilisce la scala dell'immagine in direzione perpendicolare alla linea di volo mentre la velocità della pellicola di registrazione delle immagini controlla la scala in direzione parallela alla rotta.

Miglioramento del potere risolutivo

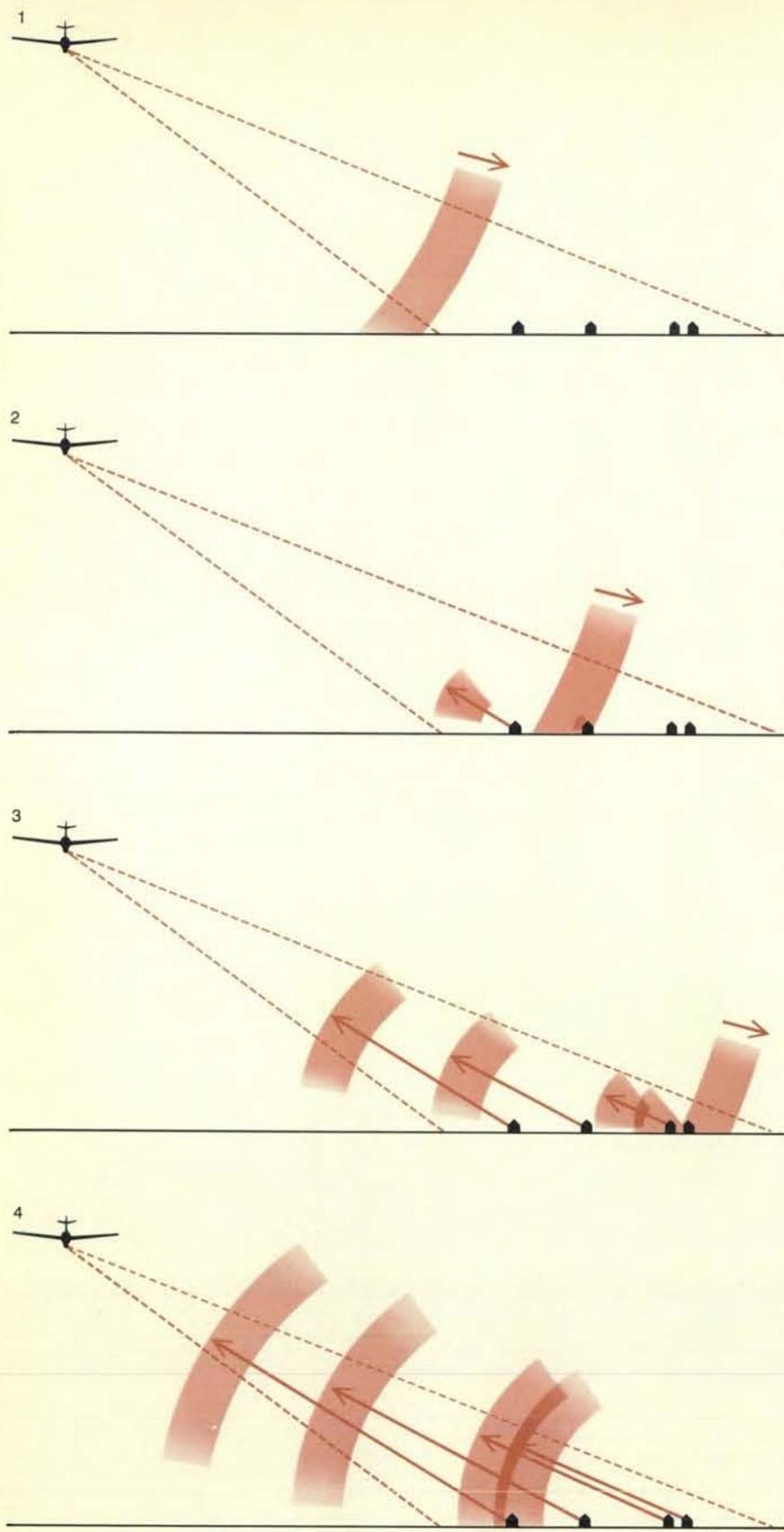
Poiché il radar di bordo a visione laterale misura la distanza di oggetti sul terreno mediante impulsi di energia a microonde, la definizione dell'immagine in direzione perpendicolare alla traiettoria è proporzionale alla durata dell'impulso. Gli impulsi sono molto corti e gli echi riflessi da due oggetti possono essere visti distinti se le loro distanze radar differiscono di una durata pari almeno a mezzo impulso. Per esempio un impulso che dura 10^{-7} secondi è lungo 30 metri e consente quindi un potere risolutivo di 15 metri. Se è richiesta una definizione maggiore, occorre ridurre la durata dell'impulso.

Nell'immagine il grado di risoluzione secondo la coordinata parallela alla linea di volo è invece proporzionale alla larghezza del fascio a microonde irradiato dall'antenna. Due oggetti che si trovano alla stessa distanza lungo la direzione parallela alla linea di volo sono visti distinti solo se lo spazio fra di essi è maggiore della larghezza del fascio d'antenna alla loro distanza. In caso contrario essi sono contemporaneamente illuminati dall'antenna, che riceve nello stesso istante l'energia riflessa da entrambi: i due oggetti appaiono sull'immagine come un'unica eco di forte intensità. È quindi l'apertura angolare dell'antenna che determina il potere risolutivo in direzione parallela alla rotta del velivolo. Poiché l'angolo resta sostanzialmente costante per tutta la portata del radar, con la distanza la larghezza del fascio aumenta e il potere risolutivo nella coordinata parallela alla linea di volo diminuisce.

L'apertura del fascio è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'antenna: il potere risolutivo può quindi essere molto migliorato impiegando antenne di dimensioni maggiori. Poiché la lunghezza fisica di un'antenna installabile su un aereo è limitata dalle dimensioni di quest'ultimo, anche l'antenna avente maggiore lunghezza effettiva in un sistema



L'immagine radar del fiume Ohio al confine fra l'Ohio e il Kentucky mostra il differente comportamento di riflettori diffondenti e speculari. Nell'illustrazione la città di Portsmouth è il gruppo di riflettori speculari lungo la sponda settentrionale del fiume in alto a sinistra. A ovest di Portsmouth il fiume Scioto confluisce nell'Ohio. Si osservi che l'acqua dei due fiumi appare nera. La strada che si snoda lungo la base delle colline sulla riva occidentale del fiume nel Kentucky è la statale 23. La regione a oriente del fiume è l'estremità della Wayne National Forest. Questa immagine mette in particolare evidenza il terreno collinoso e mostra con chiarezza la pianura alluvionale lungo il corso d'acqua. I due ponti che attraversano la parte settentrionale del fiume sono brillanti riflettori speculari delle onde radar, come pure le chiuse e la diga al centro. Le macchie bianche allungate visibili al centro del fiume sono delle chiatte. I tagli diritti che attraversano le colline sono le fasce disboscate lungo gli elettrodotti. L'immagine si riferisce a un'area di 16 per 24 chilometri ed è una piccola sezione del mosaico che copre circa 100 000 chilometri quadrati di territorio, facente parte degli stati Ohio, Kentucky, West Virginia e Virginia, eseguito per uno studio delle caratteristiche geologiche e delle riserve di gas naturale.



La distanza di un oggetto dall'aereo in direzione perpendicolare alla linea di volo è determinata dal tempo in cui gli impulsi a microonde coprono il percorso di andata e ritorno fino all'oggetto. In figura gli echi riflessi dalle due case più vicine all'antenna arrivano prima degli echi riflessi dalle due più lontane (1 e 2). Il potere risolutivo in direzione perpendicolare alla rotta è pari alla durata di mezzo impulso. Due oggetti, come la terza e la quarta casa, la cui distanza relativa è inferiore a mezzo impulso, vengono percepiti come un solo oggetto (3 e 4).

radar a visione laterale convenzionale offre un potere risolutivo di gran lunga minore in direzione parallela che in direzione normale alla linea di volo, salvo che alle distanze brevissime.

È però possibile, sfruttando il movimento dell'aereo, realizzare un'antenna relativamente corta con un fascio largo «sintetizzato», che si comporta cioè come un'antenna molto lunga con un fascio stretto. Ecco l'artificio seguito: la corta antenna effettiva trasmette degli impulsi a intervalli regolari. Quando lo aereo sorvola una certa caratteristica del terreno, il fascio comincia a illuminarla, scorre su di essa e poi la abbandona; per tutto il tempo in cui è illuminata la caratteristica riflette la serie di impulsi a microonde. Ora, quanto maggiore è la sua distanza, tanto più a lungo resta illuminata dall'antenna; in altre parole, vista da terra, l'antenna sintetizzata risulta di maggiore lunghezza per le caratteristiche più distanti e più corta per quelle più vicine. In effetti la lunghezza effettiva dell'antenna sintetizzata è direttamente proporzionale alla distanza della caratteristica. Poiché il potere risolutivo è proporzionale alla lunghezza dell'antenna, ma inversamente proporzionale alla distanza, per il radar ad apertura sintetizzata i due effetti si compensano e la definizione dell'immagine in direzione parallela alla linea di volo rimane costante per qualunque distanza. Il radar ad apertura sintetizzata rende quindi possibile ottenere immagini con elevata risoluzione di parti di terreno distanti molti chilometri.

Olografia radar

Esiste un'interessante analogia fra un sistema radar ad apertura sintetizzata e un sistema olografico a luce visibile. La olografia è un particolare processo di raffigurazione, in cui onde luminose emesse da una sorgente di luce coerente illuminano un oggetto o una scena; ogni punto dell'oggetto riflette la luce e le onde riflesse vengono fatte interferire con un fascio di onde luminose di riferimento: le numerose figure circolari di interferenza che ne risultano vengono registrate su una pellicola fotografica a grana fine. Illuminando la pellicola sviluppata con un raggio di luce coerente, le varie figure di interferenza ricostruiscono la serie originale di onde riflesse, con la formazione di una riproduzione tridimensionale della scena originale, dotata di un sorprendente grado di dettaglio e di fedeltà.

Il radar ad apertura sintetizzata è un processo di raffigurazione nel quale microonde coerenti illuminano il terreno che si trova di lato e sotto l'aeroplano. Il ricevitore radar rivela gli echi radar riflessi da ogni punto del terreno. Nelle apparecchiature elettroniche di bordo, i segnali generati nel ricevitore dal treno di impulsi riflessi vengono combinati con un treno di segnali di riferimento per creare delle figure di interferenza. Ogni figura di interferenza viene rappresenta-

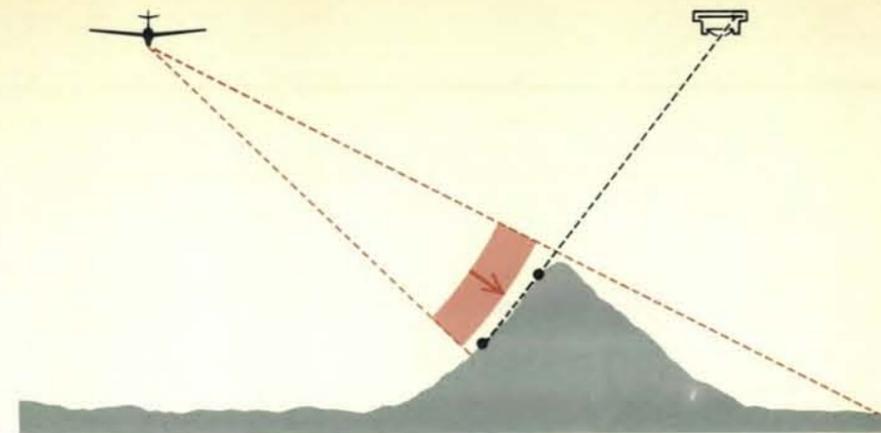
ta, linea per linea, su un tubo a raggi catodici e fotografata su una striscia mobile di pellicola per dati, la cui velocità è proporzionale alla velocità del velivolo. Questa pellicola può essere considerata come un ologramma radar.

Nei radar ad apertura sintetizzata la figura di interferenza proveniente da ciascun diffusore sul terreno è registrata non come una figura circolare, ma come una stretta linea tratteggiata parallela al bordo della pellicola di registrazione. Comunque la linea tratteggiata può essere considerata come una sezione di figura circolare di interferenza nella quale la larghezza della linea corrisponde alla lunghezza dell'impulso radar. La distanza del diffusore è registrata come distanza dal bordo della pellicola. Le tratteggiate relative a due diffusori situati alla stessa distanza e tanto vicini l'uno all'altro da essere illuminati contemporaneamente dal fascio radar danno luogo a due sequenze tratteggiate che si sovrappongono, ma che sono leggermente sfasate una rispetto all'altra. Come avviene negli ologrammi a luce visibile le due sequenze di figure di interferenza possono essere sovrapposte senza distruggere la loro capacità di formare immagini separate.

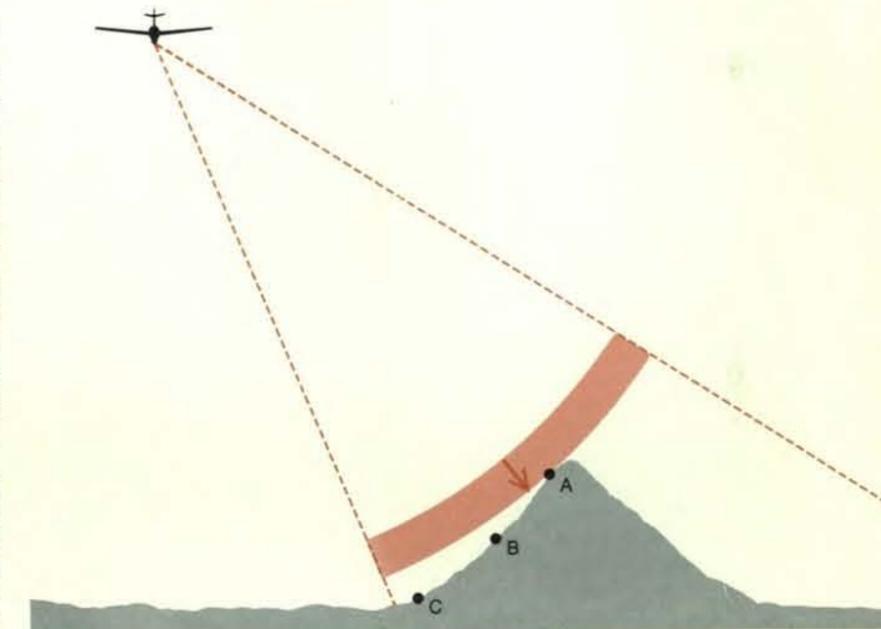
Quando una pellicola viene illuminata con un fascio di luce coerente, la figura di interferenza relativa a ogni diffusore che ha impressionato l'emulsione ricostituisce una piccola frazione della luce, trasmessa attraverso la pellicola, in una onda divergente focalizzabile mediante una lente. Molti segnali sovrapposti provenienti da altrettanti diffusori che si trovavano nel raggio radar sono trasformati in altrettante immagini ben distinte. In questo modo si forma una replica in scala ridotta a luce visibile delle onde radar ricevute dall'antenna, con la riproduzione dell'immagine del terreno originale. Poiché l'ologramma radar possiede tutti i dati provenienti da ciascun punto di ogni caratteristica del terreno per l'intera lunghezza dell'antenna sintetizzata, la definizione dell'immagine olografica corrisponde alla definizione della lunga antenna ad apertura sintetizzata e non a quella della corta antenna ad apertura reale. L'immagine formata dall'ologramma ha, di conseguenza, l'elevata risoluzione voluta.

Un modo adeguato per registrare l'immagine contenuta nell'ologramma è di far avanzare la pellicola degli echi radar nel fascio di luce coerente, facendo nel contempo progredire la pellicola fotografica in sincronismo con l'immagine in movimento. Si genera così una rappresentazione continua del terreno per l'intera lunghezza del volo. Chi è pratico di olografia potrebbe supporre che il sistema ottico impiegato per trasferire la figura sulla pellicola fotografica non sia complesso, poiché viene formata per semplice illuminazione dell'ologramma con un fascio di luce coerente. Nel caso dell'ologramma radar non è, invece, così semplice.

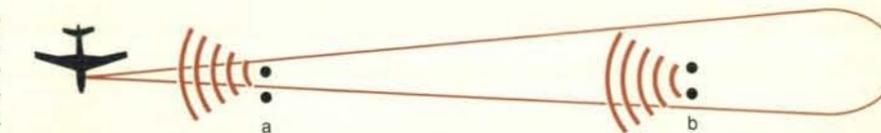
Nella registrazione dell'immagine si presentano due problemi pratici. Il pri-



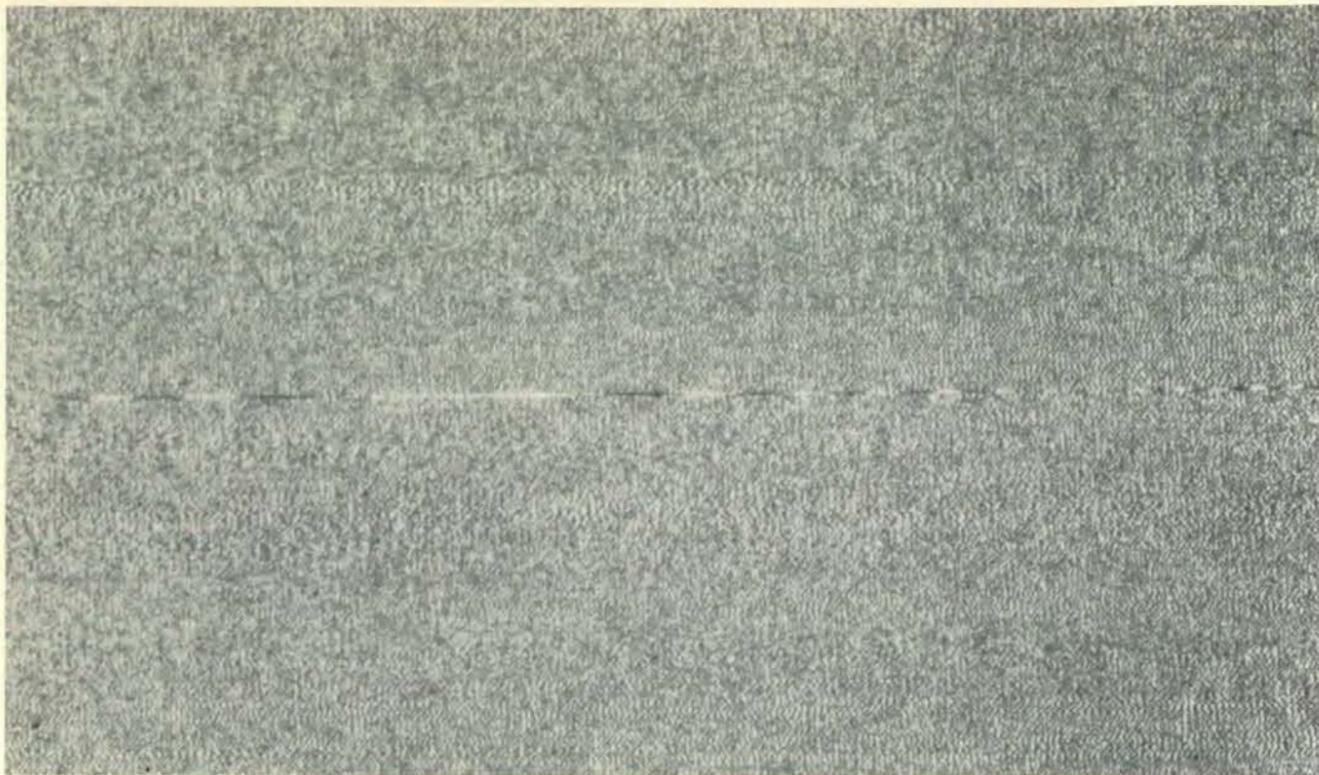
Nelle immagini radar la prospettiva è alquanto differente da quella nelle normali fotografie aeree riprese in luce visibile. Nell'immagine radar due oggetti la cui distanza relativa è inferiore alla larghezza del fascio appaiono coincidenti se si trovano alla medesima distanza dall'antenna. Ciò è dovuto al fatto che entrambi gli oggetti sono colpiti dagli impulsi a microonde e ne riflettono gli echi nello stesso istante, di modo che vengono percepiti dal ricevitore come se si trattasse di un unico oggetto. In una fotografia due oggetti risultano coincidenti se hanno le stesse coordinate angolari rispetto all'obiettivo. Quindi la prospettiva radar è analoga a quella di una macchina fotografica situata nello stesso piano verticale dell'aereo e degli oggetti, in modo che la retta congiungente gli oggetti sia compresa nella sua apertura focale.



Nelle immagini radar del terreno gli oggetti in rilievo si trovano spostati verso la linea di volo, rendendo le pareti delle montagne più ripide della realtà. Ciò avviene perché la sommità di una montagna (A) è più vicina all'aereo della parete (B) o della base (C) e gli impulsi riflessi dalla sommità ritornano per primi all'antenna. L'entità dello spostamento aumenta con l'altitudine.



Il potere risolutivo peggiora con la distanza dalla linea di volo perché il fascio radar di un radar a visione laterale ad apertura reale è orientato in direzione perpendicolare alla rotta del volo e si allarga man mano che aumenta la distanza. Due oggetti posti a una data distanza reciproca sono visti distinti quando sono vicini all'antenna (a), ma come se fossero un unico oggetto quando sono lontani (b). Un'antenna di maggior lunghezza avrebbe una risoluzione migliore, ma vi è comunque un limite alla lunghezza delle antenne installabili a bordo dei velivoli.



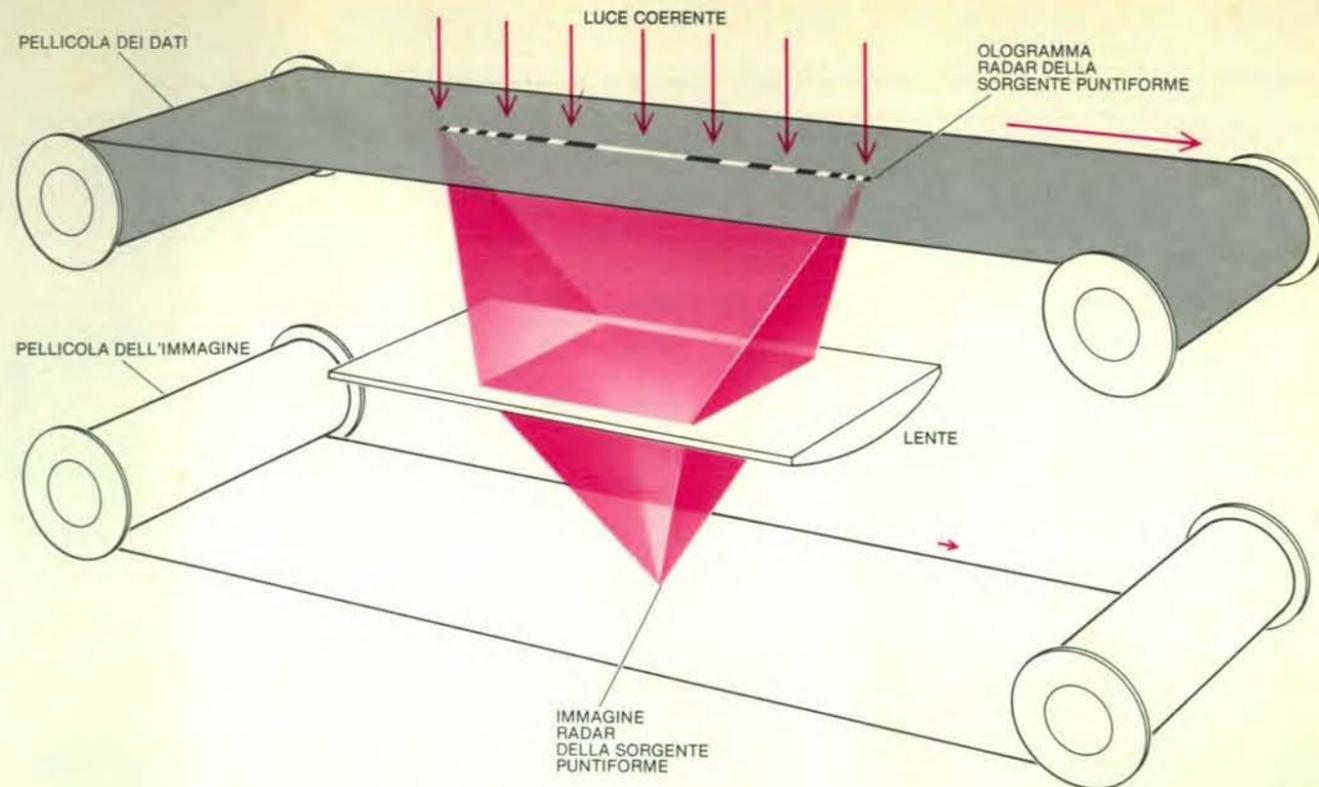
Questa porzione di pellicola dei dati mostra le figure di interferenza prodotte dai treni riflessi di microonde in un radar a visione laterale ad apertura sintetizzata. L'ologramma radar è stato ingrandito 10 volte per mostrare i dettagli. La lunga linea orizzontale di tratti bianchi e

neri al centro è la figura di interferenza di una forte eco proveniente da un grande riflettore speculare, ad esempio un traliccio di elettrodotto. Le variazioni più piccole e meno definite sono echi di minore intensità provenienti da centinaia di oggetti di minori dimensioni.

mo consiste nel fatto che l'aspetto olografico della registrazione dei dati esiste solo nella direzione della pellicola parallela alla linea di volo. I segnali sono già distinti nella larghezza della pellicola secondo le loro distanze rispettive. Di con-

seguenza il processo di focalizzazione dei segnali nella direzione parallela alla linea di volo sfoca i segnali nella direzione perpendicolare. Il fenomeno viene corretto introducendo fra la pellicola dei dati e la pellicola delle immagini una lente cilin-

drica la cui capacità di focalizzazione si esercita solo nella direzione parallela alla traiettoria di volo. Questa compensazione ottica consente la formazione di immagini correttamente focalizzate in entrambe le direzioni.



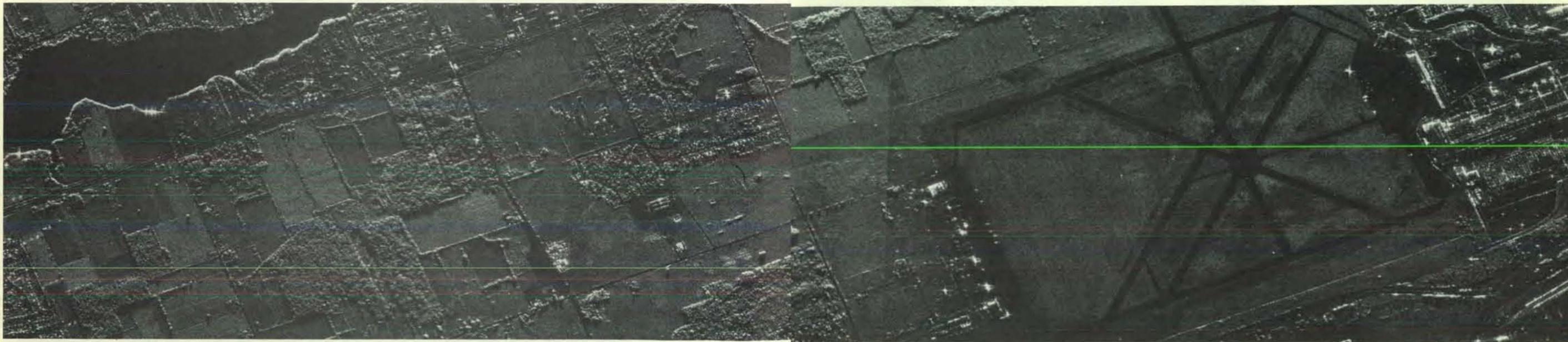
L'immagine olografica è ricostruita illuminando la pellicola dei dati con la luce coerente di un laser. Man mano che la pellicola avanza nel fascio di luce, l'immagine ricostruita impressiona un'altra pellicola in movimento. Poiché la pellicola dei dati è olografica solo secondo la

coordinata parallela alla linea di volo, le immagini in direzione perpendicolare devono essere focalizzate con una lente cilindrica. L'immagine è molto dettagliata perché le figure d'interferenza sulla pellicola dei dati sono 72 volte più lunghe che nell'immagine ricostruita.

L'altro problema consiste nel fatto che, quando si illumina la pellicola dei dati, i segnali provenienti da oggetti lontani producono fronti d'onda con raggio di curvatura maggiore di quello relativo ai segnali dovuti a oggetti più vicini. I segnali

situati ai bordi opposti della pellicola dei dati focalizzano quindi la luce a distanze differenti dalla pellicola stessa. La distanza del fuoco dalla pellicola dipende cioè dalla distanza dell'oggetto, quindi l'immagine che così si genera risulta in-

clinata rispetto al piano della pellicola fotografica e una macchina da presa non potrebbe focalizzare simultaneamente la intera larghezza del campo ottico. In effetti il problema si pone in base a considerazioni elementari; dopo tutto il

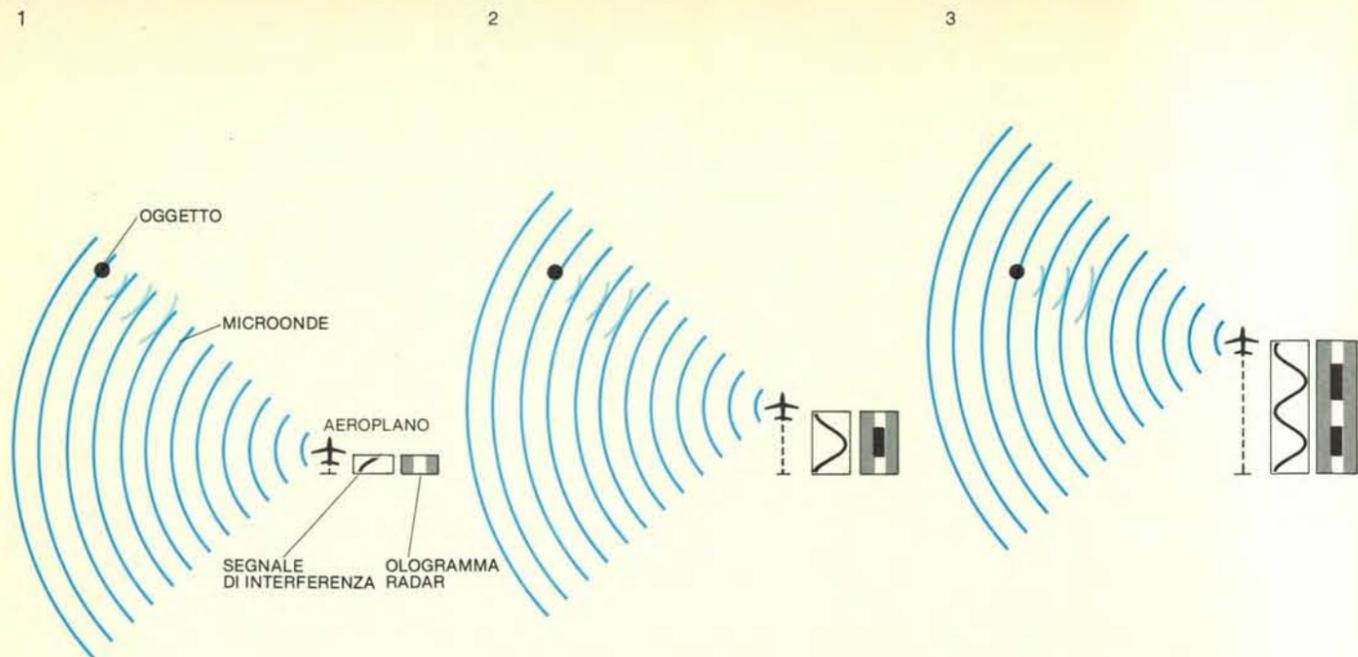


Questa porzione di una pellicola per l'immagine ripresa mediante radar a visione laterale dall'Environmental Research Institute of Michigan mostra una fascia di territorio vicino a Detroit e Ann Arbor. L'aereo

volava in direzione parallela alla dimensione maggiore della fotografia. L'acqua del Belleville Lake (una porzione arginata del Fiume Huron) e le piste principali dell'aeroporto di Willow Run risultano nere

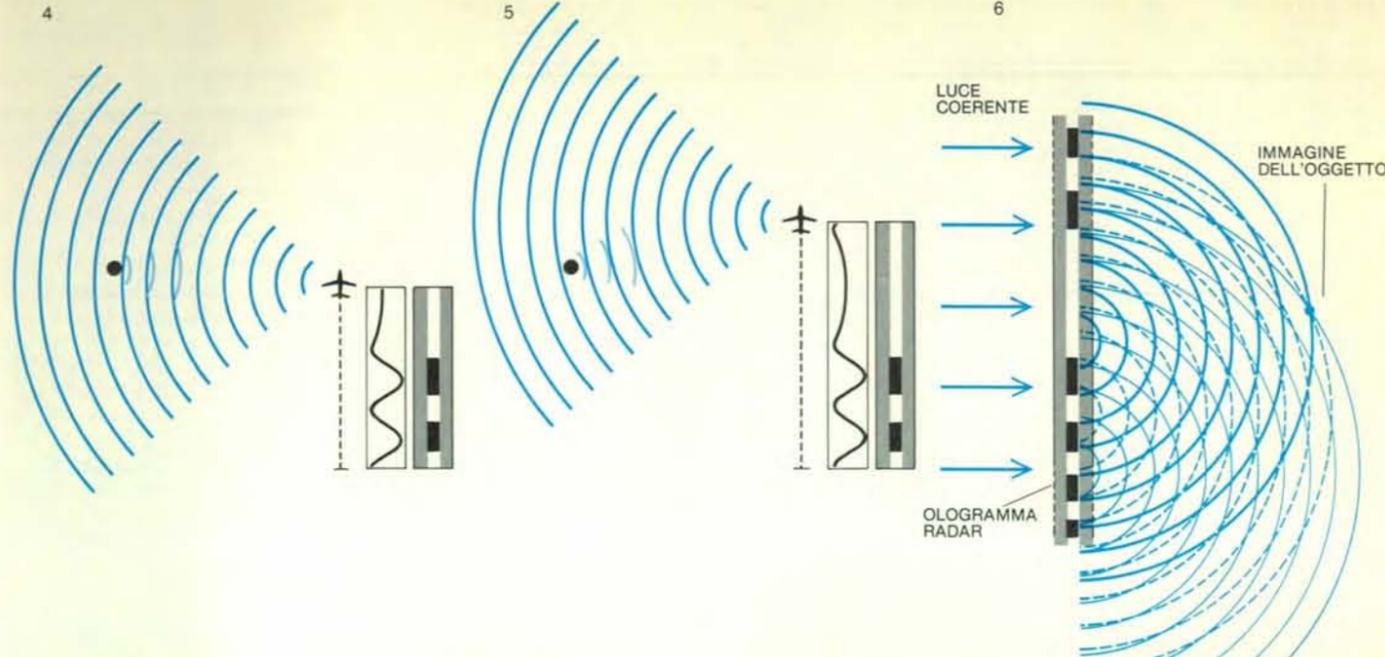
in quanto gli impulsi radar sono stati riflessi specularmente in direzione diversa da quella dove si trovava l'antenna. Gli alberi e i cespugli sono riflettori diffondenti. Gli edifici e le strade sono riflettori angolari e dirigono una forte riflessione speculare verso l'antenna. L'immagine è distorta: i quadrati appaiono infatti come rombi, perché la velocità della pellicola dei dati non è stata regolata correttamente.

lari e dirigono una forte riflessione speculare verso l'antenna. L'immagine è distorta: i quadrati appaiono infatti come rombi, perché la velocità della pellicola dei dati non è stata regolata correttamente.



Un'antenna lunga può essere «sintetizzata» da un'antenna corta sfruttando il movimento del velivolo. Durante il volo in linea retta un'antenna corta effettiva montata sotto il ventre dell'aereo emette una serie di impulsi a intervalli regolari. Ogni impulso è costituito da un treno di microonde coerenti (*curve in colore scuro*). Il potere risolutivo in direzione perpendicolare alla linea di volo è stabilito dalla durata dell'impulso, mentre nella direzione parallela alla linea di volo la definizione è stabilita dalla lunghezza d'onda della radiazione emessa. Un oggetto (*punto nero*), quando entra nel fascio (*a sinistra*), riflette verso l'antenna una frazione dell'energia impulsiva ricevuta. In corrispondenza di certe posizioni lungo la rotta, l'oggetto si trova a

una distanza dall'antenna pari a un multiplo intero di lunghezze d'onda, mentre in tutte le altre posizioni questa condizione non si verifica. Nell'illustrazione l'oggetto si trova dapprima a 11 lunghezze d'onda (1), poi a 10 (2), a 9 (3) e infine a 8,5 (4) quando risulta normale all'antenna. Da questo punto in poi la distanza fra aereo e oggetto comincia ad aumentare (5). L'antenna riceve le serie di onde riflesse (*curve in colore chiaro*) e le combina elettronicamente con un treno di lunghezze d'onda di riferimento (che non compare in figura) facendo interferire le due serie di oscillazioni. Il segnale di interferenza, sotto forma di tensione, controlla la luminosità del punto che effettua la scansione dello schermo di un tubo a raggi catodici. Quando un



impulso d'eco coincide con un impulso di riferimento, l'interferenza è costruttiva, la tensione è elevata e il punto mobile risulta luminoso. Quando la fase del segnale d'eco non coincide con la fase del segnale di riferimento l'interferenza è distruttiva, la tensione bassa e il punto oscuro. Il punto traccia quindi una serie di tratti luminosi e oscuri di lunghezza non uniforme che vengono registrati su una striscia di pellicola per dati che avanza con velocità proporzionale a quella dell'aeroplano. La serie di tratti opachi e trasparenti sulla pellicola è in effetti una figura unidimensionale di interferenza e la pellicola su cui essi sono registrati un ologramma radar. Illuminando l'ologramma sviluppato con una sorgente di luce coerente (6), ogni tratto

trasparente agisce come una sorgente separata di luce coerente. Dietro l'ologramma vi è un singolo punto in cui le onde luminose risultanti interferiscono tutte costruttivamente. In questo punto l'undicesima lunghezza d'onda luminosa (*curve sottili in colore*) emessa dal tratto trasparente corrispondente all'undicesima microonda incontra la decima lunghezza d'onda luminosa (*curve tratteggiate in colore*) emessa dal tratto trasparente corrispondente alla decima microonda e la nona lunghezza d'onda luminosa (*curve spesse in colore*) emessa dal tratto trasparente corrispondente alla nona microonda. In quel solo punto la luce proveniente dall'intera lunghezza della figura di interferenza viene focalizzata per avere un'immagine in scala ridotta dell'oggetto.

terreno che deve essere rilevato giace in posizione molto obliqua rispetto all'antenna radar ed è ovvio che l'immagine risultante sia inclinata. La correzione può essere eseguita con l'ausilio di una lente conica disposta davanti alla pellicola dei dati. I sistemi ottici per la ricostruzione dell'ologramma radar e le lenti correttive impiegate per riprendere l'immagine su una pellicola sono fra i dispositivi più insoliti mai progettati di questo tipo, ma si sono dimostrati efficacissimi nelle applicazioni pratiche.

Le applicazioni del sistema

Il primo progetto su larga scala con l'impiego del radar di bordo a visione laterale è stato il rilevamento completo della provincia di Darien nella Repubblica di Panama al confine con la Columbia. Nel 1968 la Westinghouse Electric Corporation, in collaborazione con la Raytheon Company, impiegò un sistema radar a visione laterale con antenna ad apertura reale sviluppato per l'US Army, con cui ottenne un mosaico di immagini ricoprente un'area di 20 000 chilometri quadrati. Non era stato mai possibile né vedere né rilevare la zona nella sua totalità, per la quasi perenne copertura nuvolosa. Altri rilevamenti sono stati eseguiti dalla Westinghouse e più tardi dalla Grumman

Ecosystems con un sistema radar messo a punto dalla Motorola, Inc., per l'esercito statunitense. L'apparato Motorola è adesso impiegato, con alcune modifiche, per rilevamenti eseguiti dalla Motorola Aerial Remote Sensing, Inc.

Nel 1970 i sistemi radar ad apertura sintetizzata vennero liberati dal vincolo del segreto militare. Un gruppo, costituito dalla Goodyear Aerospace Corporation e dalla Aero Service Division della Western Geophysical Company of America, consociata della Litton Industries, adattò agli impieghi civili un sistema radar ad apertura sintetizzata, costruito dalla Goodyear, e lo installò a bordo di un aereo a reazione di tipo Caravelle appartenente all'Aero Service. Le due ditte hanno poi offerto in società servizi di rilevamento topografico radar con il sistema. Un gruppo di ricercatori dell'Università del Michigan ha costruito e gestito sistemi radar analoghi di rilevamento topografico; i loro programmi sono stati proseguiti dall'Environmental Research Institute del Michigan. Anche diverse altre organizzazioni hanno contribuito allo sviluppo in questo settore.

Nel 1971 le foreste tropicali dell'America meridionale, concentrate in prevalenza nel bacino del Rio delle Amazzoni, rimanevano l'ultima grande zona del mondo di cui esistevano carte imprecise

e incomplete. Il Venezuela e il Brasile, che stavano avviando progetti di sviluppo delle zone forestali nell'Amazzonia, organizzarono un programma di rilevamento radar delle principali regioni interessate nei due paesi. Dovevano essere soddisfatti numerosi requisiti. Le immagini del territorio rilevato dovevano avere tutte le medesime caratteristiche in modo da essere confrontate con facilità fra loro; dovevano inoltre essere coerenti con quelle riprese dal satellite Landsat, che proprio in quel tempo aveva iniziato il rilevamento della Terra. Tenendo presenti queste considerazioni il gruppo Goodyear-Aero Service eseguì tutti i voli di rilevamento secondo rotte nord-sud con l'antenna radar che illuminava la superficie terrestre verso ovest. In questo modo l'aspetto del terreno e quello delle ombre corrispondeva con esattezza all'aspetto delle immagini prese dal Landsat, che era predisposto per fotografare tutta la superficie sempre in corrispondenza delle ore 09.00 locali, quando cioè l'illuminazione solare avveniva con raggi obliqui.

Poiché le immagini radar dovevano essere usate per impieghi cartografici, era richiesta la massima precisione di posizione. Il sistema di navigazione inerziale, del tutto sufficiente per controllare il volo dell'aereo, non era abbastanza pre-

ciso per l'esatto rilevamento dei punti di riferimento. Con l'ausilio del nuovo sistema di posizionamento via satellite Transit fu quindi stabilita in tutto il bacino del Rio delle Amazzoni una rete di una trentina di punti che vennero rilevati con una precisione di circa 10 metri; in corrispondenza di ciascuno di essi fu installato un ripetitore per il sistema *shoran* di posizionamento radio. Un dispositivo a bordo del velivolo poteva ricevere i segnali emessi dal ripetitore fino a distanze di 500 chilometri. La ricezione contemporanea delle emissioni provenienti da due punti di riferimento consentiva di stabilire la posizione dell'aereo con una precisione di circa 75 metri; l'operazione era ripetuta ogni sei secondi. Durante il rilevamento la posizione dell'aeromobile veniva registrata su nastro magnetico insieme con la quota e altri dati significativi. Con questo metodo fu possibile registrare e costituire in meno di un anno un mosaico di immagini ricoprente l'intera Amazzonia brasiliana, un'area di quattro milioni di chilometri quadrati, di non molto inferiore alla metà dell'Europa. Le immagini finali dell'intero rilevamento hanno una precisione prossima a 500 metri.

Per una piena utilizzazione dei rilevamenti radar e delle immagini ottenute, è stato costituito in Brasile il Projecto Ra-

dam (abbreviazione per radar dell'Amazzonia) con base a Belem, al quale erano interessati numerosi gruppi di geologi, pedologi e altri esperti. I mosaici costituirono le carte di base dei loro studi. L'analisi geologica portò a una cartografia dettagliata e a estese ricerche sul campo, avendo come guida i rilevamenti radar. Le informazioni sulla struttura, rese manifeste da certe caratteristiche superficiali di recente scoperta, fornirono indizi per correggere ed estendere la conoscenza geologica del Bacino del Rio delle Amazzoni. Sulla base del mosaico vennero scelti itinerari per alcuni tratti dell'autostrada transamazzonica e furono scoperti grossi giacimenti di minerali importanti e rilevate nuove particolarità geografiche, fra le quali con vulcanici e grandi fiumi ancora ignoti.

Finora il gruppo Goodyear-Aero Service ha effettuato rilievi delle foreste tropicali dell'Amazzonia in Brasile, Venezuela, Colombia orientale, Perù e Bolivia. I rilievi hanno praticamente eliminato le zone inesplorate dalle carte dell'America meridionale. Nessun altro strumento avrebbe potuto compiere questo lavoro. Il successo dei rilevamenti ha portato a intraprendere nuovi progetti in zone già rilevate con altri mezzi, e nel marzo del 1976 l'ultima serie di voli ha completato il rilevamento radar dell'in-

tero Brasile, un progetto cartografico di portata senza precedenti.

Altre applicazioni

Il radar a visione laterale è stato uno strumento di inestimabile valore anche per altre applicazioni. Gli studi sulla deriva dei continenti hanno dimostrato che è importante riconoscere certi tipi di faglia, di discontinuità e di altre caratteristiche tettoniche. In molti casi le caratteristiche sono evidenti in superficie, ma in modo troppo ingannevole o in scala troppo grande per essere individuate facilmente con la maggior parte degli altri mezzi disponibili. L'angolo radente, secondo cui il radar a visione laterale illumina il terreno, ne mette in evidenza la forma, mentre le grandi superfici che possono essere rilevate sempre nelle stesse condizioni facilitano l'individuazione di caratteristiche estese. Tenuto conto di quanto è importante evitare zone geologiche attive nella ubicazione di centrali elettronucleari di potenza, le immagini radar assumono un ruolo rilevante nell'analisi dei siti prescelti. Inoltre, a causa della completa oscurità al radar dei corpi idrici che non presentano dislivelli, la rete idrografica risalta nettamente nelle immagini.

Quali potrebbero essere le applicazioni future del radar a visione laterale di bor-

PROBLEMI DELLA PERCEZIONE VISIVA

Fin dai suoi primi numeri, **LE SCIENZE** edizione italiana di **SCIENTIFIC AMERICAN** ha dedicato a questo argomento numerosi articoli tra cui:

LE ILLUSIONI OTTICHE

di R.L. Gregory (n. 7)

Perché le figure semplici appaiono talvolta distorte o complesse? Forse perché il sistema visivo è costretto a interpretare un mondo nel quale gli oggetti sono normalmente distorti dalla prospettiva.

CONTORNO E CONTRASTO

di F. Ratliff (n. 49)

Vediamo i contorni quando aree adiacenti sono molto contrastate. Stranamente, determinati contorni hanno a loro volta l'effetto di far apparire grandi aree più chiare o più scure di quanto siano in realtà.

LA PERCEZIONE DELLE FIGURE A ORIENTAZIONE ALTERATA

di I. Rock (n. 68)

Molti oggetti familiari sembrano diversi quando la loro orientazione viene modificata. Sembra che ciò sia dovuto al fatto che la percezione della forma comprende l'assegnazione automatica di un «alto», di un «basso» e di «lati».

LA PERCEZIONE DELLA TRASPARENZA

di Fabio Metelli (n. 71)

Mosaici di colore opachi danno origine all'impressione di trasparenza. Da un semplice modello teorico si deducono le condizioni per cui si determina la percezione della trasparenza.

L'ORIGINE DELL'AMBIGUITÀ NELLE OPERE DI MAURITS C. ESCHER

di M.L. Teuber (n. 75)

Le affascinanti invenzioni grafiche del celebre artista olandese sono fortemente influenzate dalla matematica e dalla cristallografia, ma la loro ispirazione proviene da esperimenti sulla percezione visiva.

PERCEZIONE VISIVA DELLE STRUTTURE

di B. Julesz (n. 84)

La scoperta di strutture che sono indistinguibili, anche se i loro elementi costitutivi sono differenti, suggerisce in che modo il sistema visivo organizza la percezione degli oggetti in «figura» e «sfondo».

LA PERCEZIONE DEL COLORE DELLE SUPERFICI

di J. Beck (n. 88)

La definizione dei colori mediante la loro composizione spettrale e la loro luminosità non è sufficiente per descrivere tutte le sfumature percepite dall'occhio umano.

ILLUSIONI E MOVIMENTO

di M. Tarné (n. 92)

Correre in automobile, oppure su un treno, offre frequenti occasioni per osservare fenomeni illusori: la loro spiegazione è possibile applicando il concetto di «costanza percettiva».

CONTORNI SOGGETTIVI

di G. Kanizsa (n. 96)

Certe combinazioni di figure incomplete danno luogo a contorni chiaramente visibili anche quando non esistono fisicamente. Tali contorni sono quindi una creazione del nostro sistema visivo.

GLI EFFETTI CONSECUTIVI NEGATIVI NELLA PERCEZIONE VISIVA

di O. Eizner Favreau e M.C. Corballis (n. 103)

Fissando per un poco una cascata e guardando in seguito altrove, sembrerà che la scena si sposti verso l'alto. Lo studio di illusioni di questo tipo ci fornisce molte informazioni sul sistema visivo.

do? Fra gli specialisti del ramo, si riconosce in generale che la capacità di produrre immagini radar ha avuto uno sviluppo molto superiore a quello della capacità di ricavare informazioni dalle immagini stesse. Ora, quindi, l'attenzione si va prevalentemente concentrando sul modo di presentare l'informazione.

Alcuni miglioramenti abbastanza ovvi nelle tecniche di presentazione hanno eccezionalmente aumentato la possibilità di estrarre informazioni visive dalle immagini. Uno dei metodi seguiti è l'impiego del colore per mostrare il grande campo di luminosità dell'energia radar, campo che è spesso di gran lunga più ampio di quello accettato dalle pellicole in bianco e nero. Un secondo metodo è l'uso di tecniche stereografiche per presentare i dati di elevazione, che sono peculiari in coppie di immagini radar opportunamente generate. Un terzo metodo consiste nello sfruttare il fatto che due sensori distanziati fra loro e funzionanti in combinazione sono in generale di gran lunga più efficienti di due sensori che operano isolati. Ricercatori dell'US Geological Survey e della Goodyear Aerospace hanno lavorato insieme per combinare immagini prese con radar a visione laterale e immagini prese dal Landsat, una tecnica che conserva i vantaggi caratteristici di ciascun sistema. In questa combinazione le presentazioni colorate caratteristiche delle immagini Landsat diventano più significative grazie all'abbondanza di dettagli delle immagini radar.

A un livello più sofisticato può diventare possibile l'estrazione di una grande quantità di informazioni da insiemi multispettrali di immagini radar generate a varie lunghezze d'onda e con segnali a microonda aventi polarizzazioni diverse. Studiando le proprietà di riflessione di una superficie in funzione della lunghezza d'onda e della polarizzazione sarà possibile migliorare la percezione delle differenze superficiali e distinguere, per esempio, diversi tipi di terreno o di colture.

Il radar a visione laterale può contribuire in modo sostanziale all'esplorazione dei pianeti. Sono state già effettuate riprese della superficie della Luna e di Venere con grandi sistemi radar installati sulla Terra. Il veicolo *Apollo 17* aveva a bordo un sistema radar ad apertura sintetizzata funzionante su tre lunghezze d'onda che ha ripreso immagini della superficie lunare da una quota di 100 chilometri con una definizione di 10 metri in corrispondenza della più corta lunghezza d'onda impiegata (due metri). Tuttavia la superficie della Luna non è mai coperta da nubi, mentre quella di Venere lo è costantemente. In questi ultimi anni si è accresciuto l'entusiasmo per il progetto di porre in orbita intorno a Venere un satellite con a bordo un sistema di ripresa radar in grado di trasmettere le immagini a terra. Un sistema del genere sarebbe in grado di presentare in dettaglio il suolo di questo nuvoloso pianeta completando le informazioni fornite dalle riprese radar di limitata risoluzione e di grande ampiezza, effettuate dalla Terra.