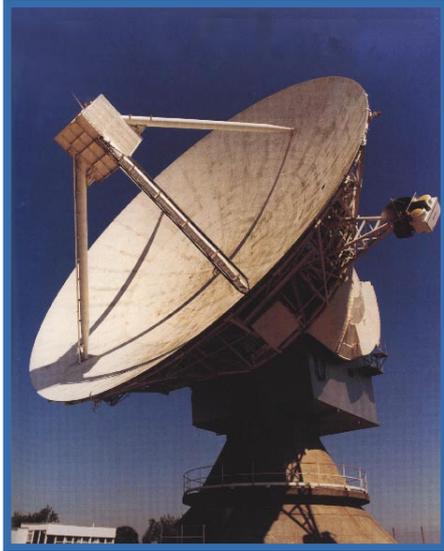


## Il radar meteorologico



**C**on gli ultimi articoli dedicati ai satelliti meteorologici, abbiamo esaminato solo un aspetto dell'osservazione a distanza della nostra atmosfera,

quello che utilizza tecniche cosiddette passive, cioè strumenti in grado di ricevere le radiazioni elettromagnetiche emesse naturalmente dagli oggetti osservati. Esiste però anche una tecnologia attiva, più adatta per risolvere nel dettaglio le proprietà atmosferiche, costituita da apparati che, sebbene diversi, lavorano tutti sul principio del radar, trasmettendo radiazioni o impulsi acustici su una stretta banda di frequenze e analizzando poi la cosiddetta eco, cioè il segnale riflesso verso il sensore, indipendentemente da ciò che ne ha causato la riflessione. L'eco dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione emessa e dalle proprietà riflettenti del bersaglio, ma anche dalle proprietà fisiche e chimiche del mezzo atmosferico in cui il segnale si è propagato; è solo considerando l'insieme combinato di tutti questi effetti che l'osservazione può essere correttamente interpretata.

### I radar meteorologici

L'impiego del RADAR (acronimo di RADio Detection And Ranging) risale, com'è noto, alla Seconda Guerra Mondiale, quando questi apparati furono per la prima volta impiegati a scopo difensivo, per l'intercettazione a distanza di aeromobili in avvicinamento; da subito venne però notato come i radar fossero "accecati" dalle precipitazioni, dimostrandosi così altrettanto validi nel rivelare la presenza di pioggia, come, di aerei nemici. Fu a partire dal febbraio del 1941 che i radar vennero per la prima volta dichiaratamente utilizzati a scopo meteorologico; da allora molti progressi sono stati compiuti nel campo della tecnologia radarmeteo ed il loro utilizzo è oggi estremamente diffuso, trovando essi impiego sia presso i servizi meteorologici nazionali, sia presso altri enti pubblici o privati ed anche a bordo di aeroplani o satelliti. In Italia, ai radar civili (ENAV) e militari (Aeronautica) dedicati all'assistenza al volo, cioè all'individuazione e quantificazione di possibili fenomeni pericolosi per la navigazione aerea (cumulonembi, turbolenza, wind shear, etc), si affiancano altri impianti, a volte anche operanti in rete, di proprietà dei servizi meteorologici

regionali e finalizzati, invece, ad osservazioni volte più che altro al controllo del territorio, per esempio di supporto all'agricoltura mediante la stima della natura e della portata delle precipitazioni. Tornando all'ambito aeronautico, non si deve però pensare che la radarmeteorologia sia appannaggio dei soli piloti di aviazione generale o commerciale; anche chi, come gli ultraleggeristi, è costretto ad operare unicamente in condizioni di tempo ottimale, può richiedere, contattando gli appositi centri di informazione in fase di briefing prevolo, ragguagli sull'eventuale presenza di fenomeni pericolosi lungo la propria rotta, per esempio legati allo sviluppo delle isolate nubi cumuliformi, tipiche dei pomeriggi estivi.

L'impulso di radiazione elettromagnetica emesso da un radar meteorologico viene focalizzato, attraverso il sistema d'antenna, in un fascio ben collimato, che possiede un'ampiezza solitamente dell'ordine del grado e frequenza compresa in una stretta banda, centrata attorno ad alcuni valori di riferimento, elencati nella tabella di Figura 1. Le bande W e K, dove operano i radar cosiddetti millimetrici, sono bande ad alta frequenza, fortemente attenuate anche dalle precipitazioni più deboli e che risultano quindi più utili per il rilevamento di nubi e aerosol. Le rimanenti bande, quelle dei radar a microonde, pur se ancora penalizzate da un certo grado di assorbimento, sono invece tutte utilizzabili per il monitoraggio delle idrometeorie (pioggia, neve o ghiaccio); in particolare, risulta che l'attenuazione subita dal fascio radar per la presenza di precipitazioni poste tra l'antenna e il volume in osservazione aumenta al diminuire della lunghezza d'onda, cioè maggiore è la lunghezza d'onda, minore l'attenuazione che il fascio subirà, ma minore anche la capacità di vedere gli oggetti più piccoli. Un radar in Banda L vedrà la pioggia forte o la grandine (oltre ad altre cose come uccelli o aerei), ma non vedrà nubi, neve o pioggia debole. I radar in Banda S rappresentano un buon compromesso tra sensibilità e attenuazione e risultano, infatti, i più indicati per le regioni tropicali e per quelle aree dove uragani, tornado e cicloni sono più frequenti. I radar a 10 cm, tuttavia, comportano notevoli problemi strutturali: infatti, poiché anche le

Figura 1.  
Le frequenze caratteristiche dei radar meteorologici

Frequenza (GHz)	Lunghezza d'onda (cm)	Banda
90	0,1	W
30	1,0	K
10	3,0	X
5	6,0	C
3	10,0	S
1.5	20,0	L

dimensioni dell'antenna sono proporzionali alla lunghezza d'onda, ne segue che per un fascio di 1° di ampiezza a 10 cm è necessario un riflettore di 7,3 m di diametro. A 5 cm un fascio della stessa apertura è invece ottenibile con un'antenna di soli 3,7 m; la Banda C offre proprio il compromesso migliore tra problematiche ingegneristiche e prestazioni meteorologiche, ed è oggi utilizzata dalla maggior parte dei nuovi impianti installati in regioni non tropicali.

Oltre che dalla lunghezza d'onda dell'impulso di radiazione emesso e dall'ampiezza in gradi del fascio, i radar sono anche caratterizzati dal numero di impulsi trasmessi in un secondo (PRF, *Pulse Repetition Frequency*) e dalla durata di ciascun impulso, valore da cui, considerando che la propagazione avviene alla velocità della luce, se ne può dedurre anche la lunghezza. In generale, possiamo dire che un radar trascorre la maggior parte del proprio tempo ad "ascoltare" più che a "parlare", trovandosi nello stato di ricezione per il 99,9% del tempo e in trasmissione per lo 0,1%.

A frequenze inferiori a quelle dei radar (e quindi a lunghezze d'onda superiori) operano poi altri sistemi di indagine attiva, come i cosiddetti *profilers* e i *lidar*. I primi sono detti anche radar UHF/VHF e utilizzano lunghezze d'onda superiori ai 30 cm (frequenze tra 1000 MHz e 50 MHz), dove i principali riflettenti sono le anomalie gassose e termiche dell'atmosfera (la cosiddetta turbolenza rifrattiva), ma anche la pioggia e le grosse particelle di ghiaccio, mentre la troposfera e la stratosfera si comportano in modo quasi trasparente, minimizzando gli effetti sulla propagazione del segnale. I *profilers* sono usati principalmente per la misura del vento medio in funzione dell'altezza, ma hanno anche applicazioni nella ricerca microfisica e termodinamica, dove sono spesso utilizzati in combinazione con i *sodar*, sistemi analoghi che utilizzano onde acustiche invece di radiazione elettromagnetica. I *lidar* operano a frequenze ottiche e sono sensibili agli aerosol, alle molecole di gas atmosferico, alle goccioline d'acqua ed alle particelle di ghiaccio. Vapore acqueo, ozono, metano e molte altre

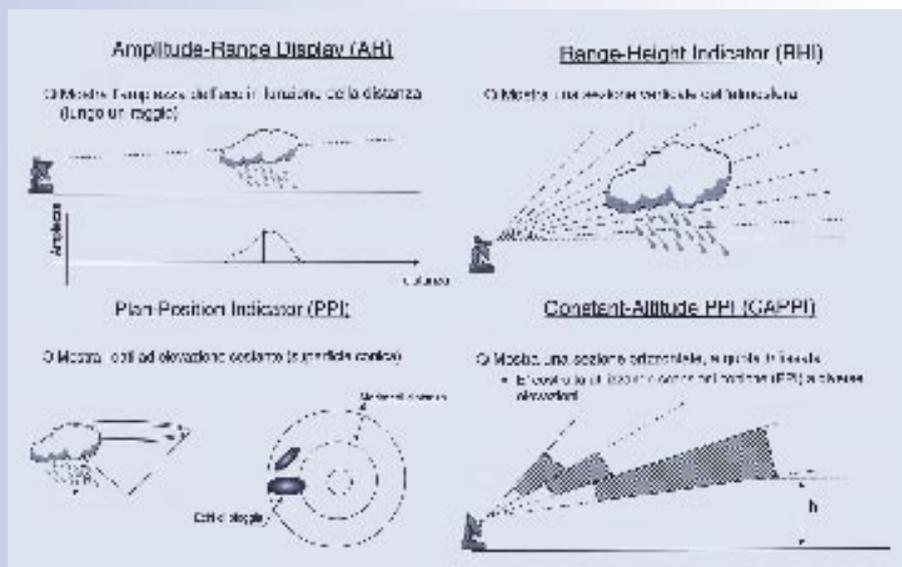
sostanze assorbono radiazione infrarossa e ottica a specifiche lunghezze d'onda, che corrispondono a linee di assorbimento molecolare note; gli effetti sulla propagazione vengono così utilizzati per la determinazione del vento e per la costruzione dei profili di concentrazione atmosferica degli aerosol, dell'ozono e del vapore acqueo.

Figura 2. Le modalità di visualizzazione del dato radar

<b>AR</b>	<b>Amplitude-Range</b>	<i>mostra l'eco in funzione della distanza (lungo un raggio)</i>
<b>HTI</b>	<b>Height-Time Indicator</b>	<i>mostra l'eco lungo una tratta radar fissa, in funzione del tempo</i>
<b>RHI</b>	<b>Range-Height Indicator</b>	<i>mostra una sezione verticale dell'atmosfera</i>
<b>PPI</b>	<b>Plan-Position Indicator</b>	<i>mostra i dati ad elevazione costante (superficie conica). Il radar esegue una scansione a 360°, mantenendo costante l'elevazione dell'antenna rispetto al suolo e disegnando quindi una superficie conica, che viene poi rappresentata sul piano orizzontale</i>
<b>CAPPI</b>	<b>Constant-Altitude PPI</b>	<i>mostra una sezione orizzontale dell'atmosfera (a quota fissa). Il radar esegue diverse scansioni di tipo PPI ad inclinazione differente, disegnando una serie di superficie coniche coassiali, aventi vertice comune nell'antenna. Queste superfici vengono quindi intersecate con un piano orizzontale, parallelo al suolo e di altezza costante.</i>

## I principi base della radarmeteorologia

Quando il fascio radar incontra un ostacolo nell'atmosfera – per esempio una goccia di pioggia – l'energia incidente viene attenuata, fondamentalmente a causa di due fenomeni: l'assorbimento e la diffusione, che insieme rendono conto del processo di attenuazione. Al momento del contatto con la goccia d'acqua, parte dell'energia viene assorbita dalla goccia e parte viene diffusa in tutte le direzioni, cosicché solo una frazione molto piccola della radiazione incidente viene rinviata esattamente nella direzione di provenienza, cioè verso il radar. Al di là delle gocce d'acqua, anche la grandine, la neve o gli insetti sono in grado di provocare attenuazione della radiazione elettromagnetica, mentre i gas atmosferici e i piccoli aerosol sono responsabili solo per un certo grado di assorbimento, essendo troppo piccoli per diffondere.



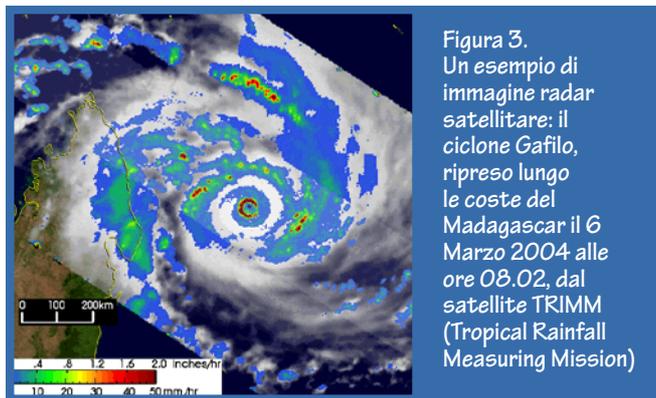


Figura 3. Un esempio di immagine radar satellitare: il ciclone Gafilo, ripreso lungo le coste del Madagascar il 6 Marzo 2004 alle ore 08.02, dal satellite TRIMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)

L'attenuazione del fascio radar diviene significativa quando gli impulsi devono attraversare molti ostacoli oppure un grande volume di atmosfera, cioè muoversi attraverso forti precipitazioni e/o per lunghe distanze. Osservando una zona di intense precipitazioni, l'assorbimento dovuto al gas atmosferico può provocare una diminuzione del 5% nella potenza dell'eco, mentre la presenza di pioggia o grandine può portare ad una riduzione dell'80%. Analizzando un'immagine radar, è così possibile osservare una regione di vuoto dietro (dal punto di vista dell'antenna) l'eco dovuta ad un forte temporale; lì può ancora esservi precipitazione, ma il fascio radar è stato così pesantemente attenuato, che solo una frazione molto bassa dell'originale potenza incidente è disponibile per essere ulteriormente diffusa.

Echi radar provenienti da pioggia o grandine interne a un forte temporale hanno l'aspetto di celle dai bordi molto netti, con un intenso nucleo di riflettività, indicante appunto la presenza di intense precipitazioni; le celle possono apparire isolate o raggruppate, con ciascuna di esse che tende ad avere una vita media di circa 30 minuti. Rapidi spostamenti delle celle o loro veloci evoluzioni, così come una marcata differenza nei movimenti delle singole celle, potrebbero essere associati a zone di forte maltempo (intense grandinate, forti venti e/o pioggia molto forte), mentre un movimento molto lento o il passaggio ripetuto delle celle sopra una determinata zona può invece segnalare la potenziale presenza di alluvioni.

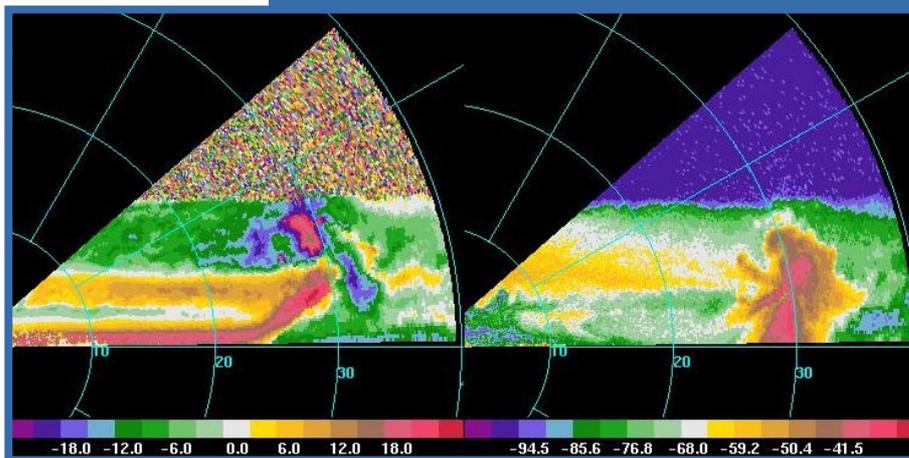
La frazione di energia che ritorna al radar, indipendentemente da ciò che ne ha causato la riflessione, viene espressa mediante una grandezza detta *riflettività* e designata con la lettera *Z*. Adottando alcune ipotesi semplificatrici, la teoria permette di legare, in un'unica relazione nota come *equazione del radar*, la riflettività di un volume di atmosfera con l'intensità dell'eco, le caratteristiche del radar, quelle del mezzo in cui avviene la propagazione dell'onda elettromagnetica e quelle del bersaglio che ha provocato la riflessione. Dato che nella pratica la riflettività può coprire un ampio intervallo di valori, da segnali molto deboli a segnali molto forti, risulta più conveniente esprimerla in  $dBz = 10 \log_{10} Z$ , cioè mediante la scala logaritmica decibel: maggiori i valori di dBz, più alta la potenza riflessa e rice-

vuta dal radar. Fermo restando che le misure di riflettività dipendono molto dalla latitudine in cui vengono effettuate, possiamo dire che la neve debole è molto inefficiente in termini di riflessione (da 5 a 20 dBz), mentre la pioggia moderata si attesta sui 30-45 dBz e una forte grandinata può raggiungere 60-75 dBz.

Ma oltre che all'intensità del segnale riflesso, i moderni radar meteorologici sono sensibili anche alla sua frequenza, permettendone il paragone con quella dell'impulso originariamente trasmesso. Quando infatti il bersaglio si trova in movimento rispetto al radar, le frequenze dei due segnali differiranno per una minima quantità, detta *spostamento Doppler*, che risulta proporzionale alla velocità radiale dell'oggetto osservato, cioè alla componente della sua velocità lungo la linea che congiunge l'antenna con il bersaglio stesso. È importante comprendere questa limitazione, perché, ad esempio nel caso di un ciclone, un singolo radar non potrà vedere la rotazione di un intero vortice, ma solo le componenti in allontanamento o avvicinamento, mentre quelle laterali appariranno avere velocità radiali molto basse.

L'utilizzo di un radar come strumento di misura quantitativo, oltre che qualitativo, è comunque un problema assai delicato, che dipende sia dalla consistenza di potenze e frequenze molto elevate con livelli di segnale molto basso e con flussi di dati al contrario molto alti, sia con la complessità intrinseca dello stesso radar, cioè con la necessità di mantenerlo sempre calibrato ed in perfetta efficienza. Il segnale ricevuto deve inoltre essere depurato da effetti intervenuti durante la propagazione del fascio, oltre che da echi attribuibili a bersagli indesiderati (il cosiddetto clutter, come ad esempio la riflessione dovuta all'orografia); gli stessi bersa-

Figura 4. Una scansione RHI in velocità radiale (a sinistra) e in potenza ricevuta (a destra). Le velocità radiali mostrano caratteristiche consistenti con quelle di una updraft, cioè con la violenta ascesa di aria, provocata dall'aspirazione di un cumulonembo in fase di formazione; le velocità positive sono da intendersi in allontanamento rispetto all'antenna radar, quelle negative in avvicinamento. Dall'immagine della potenza ricevuta (che, lo ricordiamo, non è esattamente la riflettività, ma un parametro ad essa proporzionale, rappresentando la pura e semplice intensità del segnale ricevuto) risultano invece ben evidenti le zone a maggior riflettività radar, quelle cioè associate alla presenza di intense precipitazioni



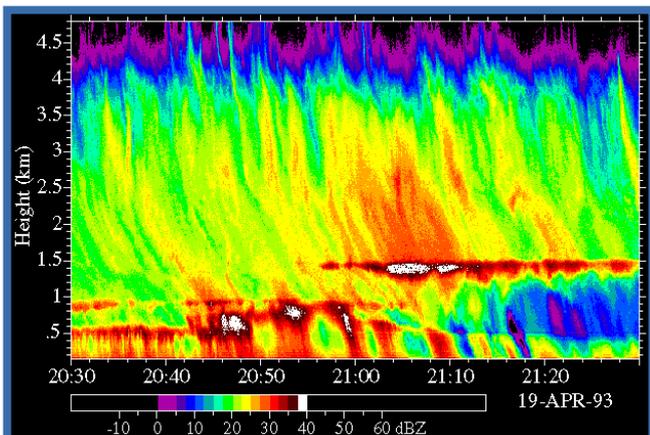


Figura 5.

Un bell'esempio di tripla *bright band*. Quando i fiocchi di neve in caduta cominciano a fondersi, si ricoprono di acqua e vengono visti dal radar come se fossero delle grosse gocce, associate quindi ad elevati valori di riflettività. Terminato il processo di fusione, ne risulta una vera e propria goccia, di dimensioni ridotte rispetto al fiocco. Se durante la caduta, la goccia solidifica nuovamente, allora il fenomeno si ripresenta identico all'attraversamento di una successiva zona di fusione (in figura è infatti possibile identificarne altre due sulla sinistra)

gli meteorologici non sono mai uniformi e uguali a se stessi, ragion per cui l'utilizzo del radar non deve essere mai inteso in senso assoluto, ma sempre in combinazione con altro tipo di sensoristica. Per esempio, il Wind Shear And Turbulence Warning System dell'aeroporto Chek Lap Kok di Hong Kong integra il dato radar con i rilevamenti provenienti da una rete di anemometri, da due profiler, da un lidar e da una serie di stazioni di osservazione meteorologica; un adeguato software è quindi in grado di elaborare tutte queste informazioni e di visualizzare il dato finale, cioè l'esistenza o meno di condizioni di turbolenza sulle piste, direttamente in torre di controllo.

I fattori che possono concorrere a modificare il fascio radar durante la sua propagazione sono di natura sia geometrica che fisica (legati a variazioni dell'indice di rifrazione atmosferico) o dovuti alla presenza di ostacoli naturali o artificiali. Se tralasciati conducono ad un'errata valutazione della situazione meteorologica; le correzioni possono intervenire a livello analogico, al momento della misura, o a livello digitale, in fase di riduzione dei dati. L'intensità degli echi tende a diminuire all'aumentare della distanza dal radar, sia a causa dell'allargamento progressivo del fascio, che tende ad aprirsi a ventaglio, diminuendone così la percentuale riempita dalle precipitazioni; sia perché, propagandosi in linea retta, all'aumentare della distanza tende sempre più ad inquadrare la parte superiore delle precipitazioni, per l'effetto della curvatura terrestre che lo allontana progressivamente dal suolo; sia per l'attenuazione, cui abbiamo già accennato, dovuta alla prima fascia di precipitazioni incontrata. Alcuni deboli echi radar possono poi essere dovuti non a bersagli meteorologici, ma alla presenza di aerei, a fumo o cenere associati a vasti incendi, a sciami di insetti o a stormi di uccelli o anche al suolo, quando, in circostanze particolari dette di *propagazione anomala*, la variazione dell'indice di rifrazione

atmosferico è tale da "legare" il fascio radar al suolo, facendogli seguire la curvatura dell'orizzonte ed aumentandone enormemente la portata. Un altro effetto, più propriamente meteorologico, è quello detto di *bright band*, che si presenta quando una particella di neve o ghiaccio, attraversando il livello dell'isoterma 0°C, comincia a fondersi, ricoprendosi di una sottile pellicola d'acqua. Poiché i più alti valori di riflettività sono associati alla neve bagnata, questo fenomeno, particolarmente evidente nel caso di nubi stratiformi, provoca un notevole aumento di riflettività rispetto agli strati circostanti; per la sua eliminazione si fa ricorso ad un'interpolazione tra due strati orizzontali.

La visualizzazione del dato radar (sia esso un valore di riflettività o di velocità radiale) avviene in base alle necessità operative dell'utente, secondo modalità che, come riportato nella tabella di Figura 2, possono consistere in rappresentazioni sia bidimensionali, di ampiezza dell'eco in funzione della distanza o del tempo, che tridimensionali, con l'aggiunta di una terza informazione resa mediante un codice colore.

## La doppia polarizzazione

Una volta ottenuto un valore di riflettività il più possibile corretto, esso può essere convertito in quantità di pioggia per mezzo di una relazione matematica, che ha però il difetto di essere puramente empirica e soggetta a molte incertezze, dipendenti soprattutto dalla distribuzione delle dimensioni delle gocce nel volume in esame e dalla durata della misura.

Per migliorare il grado di precisione vengono usati i cosiddetti sistemi a *doppia polarizzazione*, dove la riflettività viene valutata su due piani tra loro ortogonali. Infatti, tanto più le gocce sono grandi, tanto più assumono, durante la caduta, una forma schiacciata e tanto più la riflettività orizzontale differisce da quella verticale, fornendo così un'indicazione della distribuzione delle dimensioni. Inoltre, la doppia polarizzazione permette di distinguere le gocce di pioggia dalle particelle di ghiaccio, che durante la caduta conservano una forma pressoché sferica.

Oltre alla doppia polarizzazione, alcuni radar più evoluti sono in grado di trasmettere anche a due o più lunghezze d'onda; ciò permette di ottenere informazioni più precise circa i bersagli riflettenti, poiché questi reagiscono in modo diverso a ciascuna delle onde incidenti.

In conclusione, si deve sottolineare che, nonostante queste imprecisioni, rispetto al satellite meteorologico, che vede essenzialmente la cima delle nubi, e ai sensori di punto, che rilevano dati su di un punto dello spazio, il radar fornisce una misura delle grandezze osservabili su tutto lo spazio e rileva in maniera completa la struttura dei fenomeni meteorologici. Un suo utilizzo operativo è particolarmente utile nel *nowcasting*, la previsione a brevissima scadenza, soprattutto riguardo all'individuazione di fenomeni violenti (temporali, grandine, wind shear). Un ulteriore miglioramento, che rende possibile una visione sempre più completa delle osservabili meteorologiche, si ottiene dall'integrazione del dato radar con quelli provenienti da altri sensori, sia puntuali al suolo o in quota (palloni sonda) che satellitari, così come dall'interconnessione tra due o più radar (reti radar).