

SULL'EQUAZIONE RADAR IN MEZZI ALEATORI DIFFONDENTI E DISSIPATIVI

F. S. Marzano, G. Ferrauto

Dip. di Ingegneria Elettrica - Centro di Eccellenza CETEMPS, Università dell'Aquila
Monteluco di Roio, 67040 L'Aquila, Italy
marzano@ing.univaq.it, ferrauto@ing.univaq.it

Abstract

The meteorological radar equation in its classical form takes into account two-way path attenuation for each range bin. Indeed, for strong attenuating media such as intense rainfall, hydrometeor extinction within each range bin can be significant. The classical radar equation (for simplicity, considered for a single-polarization or for unpolarized radiation) is here generalized to include such a range-bin extinction effect. It is shown that only in the case of low-to-moderate attenuating media, the derived range-bin extinction factor is, by definition, closed to one so that the classical radar equation can be used. These theoretical results are also obtained by using a microwave radiative transfer approach described by means of the well-known integro-differential equation taking into account multiple scattering. This result supports the conclusion that radar analysis in strong attenuating media should include first-order scattering effects. Numerical simulation are performed by using a Gaussian-shaped double raincell along the path with a varying intensity from C to W band. Results confirm that the effect of the range-bin extinction factor, depending on frequency and range resolution, can be up to several decibels at C and X band for intense rain and up to tens of decibels at Ka band and above even for moderate rain.

INTRODUZIONE

La tecnica radar a microonde viene generalmente impiegata per il telerilevamento di corpi o mezzi caratterizzati da diffusione e.m. superficiale (e.g., superficie terrestre e marina) e da diffusione e.m. volumetrica (e.g., coperture vegetate, atmosfera turbolenta e atmosfera con nubi). In quest'ultimo caso, la caratterizzazione del mezzo aleatorio avviene usualmente facendo ipotesi di incoerenza sulla radiazione e.m. diffusa da volumi di particelle distribuite aleatoriamente. L'equazione radar classica (per semplicità, considerata nel caso di radiazione non polarizzata) tiene conto della natura volumetrica dell'osservazione, introducendo la nozione di riflettività volumetrica equivalente della cella di risoluzione radar, pesata da eventuali attenuazioni del mezzo interposto tra il radar e il volume considerato. Tali attenuazioni sono schematizzate attraverso un fattore esponenziale (decrescente) di percorso, legato a fenomeni sia di assorbimento e che di diffusione e.m.. L'entità di tale attenuazione dipende essenzialmente dalla frequenza dell'onda e.m. trasmessa, dalla distribuzione aleatoria delle dimensioni delle particelle e dalle loro proprietà dielettriche (e.g., [1]).

In questo lavoro si mostra che per mezzi con attenuazioni specifiche significative, l'equazione radar classica deve essere generalizzata introducendo un fattore correttivo che tenga conto delle dissipazioni all'interno del volume della cella di risoluzione. Per definizione, tale fattore correttivo si riduce a 1 nel caso di mezzo debolmente

dissipativo: ciò equivale a generalizzare la definizione di riflettività volumetrica equivalente della cella di risoluzione radar. L'effetto di sottostima dell'eco radar, commesso nel trascurare tale fattore correttivo, viene mostrato essere dell'ordine di diversi decibel in tipiche applicazioni meteorologiche con ovvie conseguenze sull'accuratezza delle stime di variabili geofisiche. Particolare enfasi è data all'uso di radar meteorologici in banda C, X, Ka e W per l'osservazioni di nubi e precipitazioni atmosferiche da terra e da satellite.

Tale generalizzazione dell'equazione radar classica in mezzi diffondenti e dissipativi viene ulteriormente inquadrata come caso particolare della teoria del trasferimento radiativo (TR). In determinate condizioni, anche l'effetto della cosiddetta diffusione e.m. multipla, dovuta a recupero di radiazione e.m. nella direzione di osservazione da parte del volume di particelle, non può essere trascurato [2], [3]. In questo lavoro si dimostra come la soluzione al primo ordine di diffusione dell'equazione integro-differenziale del trasferimento radiativo coincide con l'espressione dell'equazione radar generalizzata, fornendo così una chiave di lettura fisica a tali considerazioni.

EQUAZIONE RADAR IN MEZZI DISSIPATIVI

L'equazione dei radar meteorologici, operanti in mezzi diffondenti e dissipativi, lega la potenza media ricevuta $\langle P_R(r, \Omega_0) \rangle$, ottenuta dalla media di echi radar dovuti a diffusione nel volume di risoluzione ΔV_r a distanza r nella direzione di puntamento Ω_0 , alla potenza trasmessa P_T . La sua espressione nella forma più generale è:

$$\langle P_R(r, \Omega_0) \rangle = \frac{P_T I^2 L^2(r)}{(4\pi)^3} \int_{\Delta V_r} \mathbf{h}(r', \Omega) \frac{G^2(\Omega, \Omega_0)}{r'^4} e^{-2\tau(r')} d^3 r' \quad (1)$$

dove I è la lunghezza d'onda, L è l'attenuazione di percorso (di sola andata o ritorno), \mathbf{h} è la riflettività radar volumetrica, Ω è l'angolo solido di osservazione, τ è lo spessore ottico lungo r , $d^3 r'$ è l'elemento di volume e $G(\Omega, \Omega_0)$ è il guadagno dell'antenna radar. Quest'ultima è tale che $G(\Omega) = G_0 |f_n(\Omega)|^2$ con $G_0 = G(\Omega_0)$ il valore massimo lungo Ω_0 and $|f_n(\Omega)|^2$ la funzione di radiazione normalizzata in potenza.

La riflettività volumetrica radar \mathbf{h} può essere legata al fattore di riflettività equivalente Z_e mediante:

$$\mathbf{h}(r, \Omega) = \frac{p^5 |K|^2}{I^4} Z_e(r, \Omega) \quad (2)$$

dove K è il fattore complesso di polarizzabilità del mezzo, mentre l'attenuazione di percorso è data da:

$$L(r, \Omega) \equiv L(r, \Omega_0) \equiv L(r) = e^{-\int_0^r k(r') dr'} = e^{-\tau(r)} \quad (3)$$

essendo k l'attenuazione specifica volumetrica. Assumendo $\Delta r \ll r$, la (1) fornisce la seguente espressione approssimata [1], [3]:

$$\langle P_R(r, \Omega_0) \rangle \approx C \frac{Z_{eb}(r, \Omega_0)}{r^2} L^2(r) \quad (4)$$

dove C è la costante strumentale, mentre $Z_{eb}(r)$ è la riflettività equivalente *mediata* data da:

$$Z_{eb}(r, \Omega_0) \equiv Z_e(r, \Omega_0) f_b(r) . \quad (5)$$

con il fattore volumetrico di media $f_b(r)$ definito da:

$$f_b(r) \equiv \frac{1}{2k\Delta r} (1 - e^{-2k\Delta r}) = \frac{1}{2\Delta \tau_r(r)} (1 - e^{-2\Delta \tau_r(r)}) \quad (6)$$

con $\Delta \tau_r$ lo spessore ottico del volume di risoluzione. Se $\Delta \tau_r \ll 1$ (volume piccolo e/o attenuazione trascurabile), allora $f_b(r) \approx 1$ e la (4) si riduce all'equazione radar classica.

E' possibile dimostrare che la (5) si può ottenere risolvendo l'equazione integro-differenziale del trasferimento radiativo (RTE) nell'approssimazione di diffusione al primo ordine (FOS). A tal scopo è necessario introdurre una definizione di riflettività apparente \mathbf{h}_a in termini di intensità specifica ricevuta I_R come segue [3],[4]:

$$Z_a(r, \Omega) \equiv \frac{I^4}{p^5 |K|^2} \mathbf{h}_a(r, \Omega) = \frac{I^4}{p^5 |K|^2} \left[\frac{4p}{\Delta r} \frac{\langle I_R(r, \Omega) \rangle}{F_T(r, \Omega)} \right] \quad (7)$$

dove F_T è la densità di potenza trasmessa.

Ricordando che la soluzione di RTE al primo ordine di diffusione per uno strato diffondente (con condizioni al contorno di intensità specifica nulla) è data da:

$$I(0, -\mathbf{m}, \mathbf{f}) \equiv I_1(0, -\mathbf{m}, \mathbf{f}) = \frac{w}{4p} \mathbf{m}_0 F_0 \frac{p(-\mathbf{m}, \mathbf{f}; \mathbf{m}_0, \mathbf{f}_0)}{\mathbf{m} + \mathbf{m}_0} \left[1 - e^{-\tau_s \left(\frac{1}{\mathbf{m}} + \frac{1}{\mathbf{m}_0} \right)} \right] \quad (8)$$

dove μ_0 è il coseno dell'angolo zenitale di incidenza, w è l'albedo volumetrico, p è la funzione di fase della diffusione, $F_0 = F_T$ e $\tau_s = \Delta \tau_r$. Usando la definizione di \mathbf{h} in termini di p e w e sostituendo la (8) nella (7) si ottiene [4]:

$$Z_{a FOS}(r, \Omega_0) = Z_e(r, \Omega_0) \frac{(1 - e^{-2\Delta \tau_r})}{2\Delta \tau_r} \quad (9)$$

ovvero

$$Z_{a FOS}(r, \Omega_0) = Z_e(r, \Omega_0) f_b(r) = Z_{eb}(r, \Omega_0) \quad (10)$$

L'ultima uguaglianza dimostra quanto anticipato.

SIMULAZIONI NUMERICHE

A titolo di esempio, si riporta una valutazione numerica del fattore volumetrico $f_b(r)$, generalmente assunto pari a 1 (o 0 dB) nelle applicazioni. La Fig. 1 si riferisce all'osservazione di un mezzo caratterizzato da precipitazione atmosferica con intensità di precipitazione R (in mm/h), avendo assunto per il calcolo delle relazioni Z_e-R e $k-R$ tipiche relazioni di potenza ottenute da analisi statistiche di misure in banda C, X, Ku, K, Ka e W e riportate in letteratura [4].

Considerando che al crescere di R cresce l'attenuazione specifica k e l'albedo volumetrico w , la figura dimostra che per tipiche risoluzioni in distanza (tra 125 e 1000 m) l'ipotesi $f_b(r) \equiv 0$ dB non è sempre verificata. In banda C i valori di $f_b(r)$ risultano sempre inferiori a 0.6 dB, mentre in banda X e Ku per risoluzioni di 500 m si hanno valori fino a 1 e 2 dB per 50 e 100 mm/h, rispettivamente. Come previsto, I maggiori scarti da 0 dB si hanno in banda Ka e W, dove per $R=50$ mm/h i valori di f_b sono superiori a 5 dB.

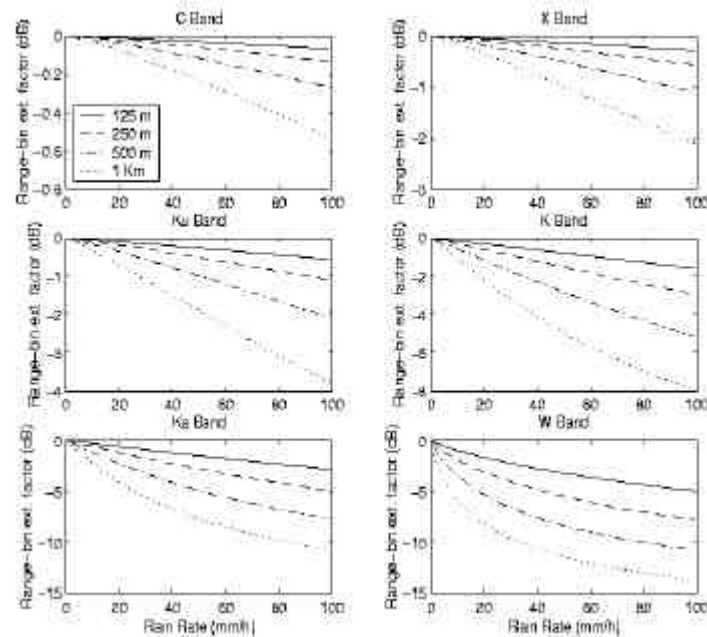


Fig. 1. Simulazioni del fattore volumetrico f_b in funzione dell'intensità di precipitazione.

Quanto mostrato conferma che per una descrizione accurata della risposta radar in mezzi diffondenti e dissipativi occorra considerare anche l'effetto di diffusione al primo ordine, soprattutto se la risoluzione in distanza dell'osservazione dà luogo a spessori ottici maggiori di 1 all'interno della cella di risoluzione.

Ringraziamenti: tale lavoro è stato finanziato da MIUR, ASI e CNR-GNDCI.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F.S. Marzano and P. Bauer, "Sensitivity analysis of airborne microwave retrieval of stratiform precipitation to the melting layer parameterization", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 39, pp. 75-91, 2001.
- [2] F.S. Marzano, L. Roberti, and A. Mugnai, "Impact of incoherent backscattering upon radar echoes above 10 GHz", *J. Phys. and Chem. of the Earth – Part B*, vol. 25, n. 10, pp. 300-305, 2000.
- [3] F.S. Marzano, L. Roberti, S. Di Michele, A. Mugnai and A. Tassa, "Modeling of radar reflectivity at attenuating wavelength due convective clouds", *Radio Sci.*, vol. 42, in press, 2002.
- [4] F.S. Marzano and G. Ferrauto, "On the meteorological radar equation in attenuating media", *Proc. of ERAD'02*, Delft (NL) Nov. 18-21, 2002.