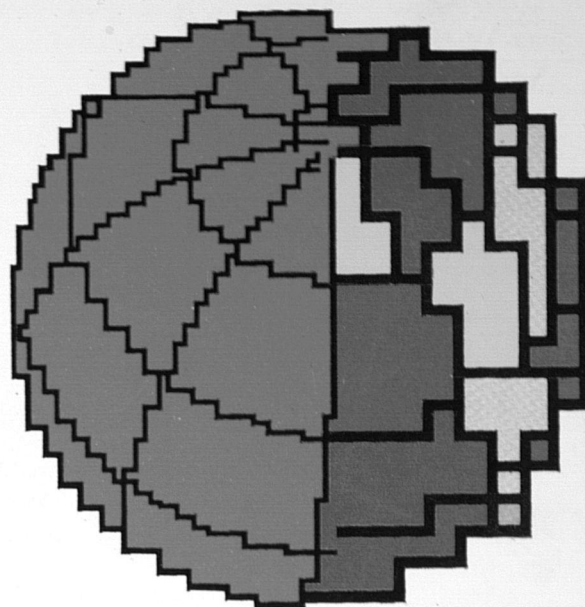


**Istituto Nazionale
di Geofisica**



Profili empirici di densità
elettronica nell'alta atmosfera

G. Di Giovanni

Pubblicazione n. 544

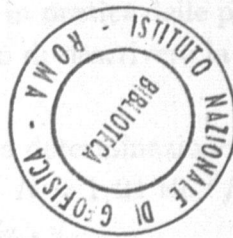
PROFILI EMPIRICI DI DENSITÀ ELETTRONICA NELL'ALTA ATMOSFERA

GIOVANNI DI GIOVANNI

Profili empirici di densità elettronica nell'alta atmosfera

G. Di Giovanni

Istituto Nazionale di Geofisica
Via di Villa Ricotti 42
00161 Roma



Ottobre 1992

PROFILI EMPIRICI DI DENSITÀ ELETTRONICA NELL'ALTA ATMOSFERA

GIOVANNI DI GIOVANNI

GENERALITÀ SULLA IONOSFERA TERRESTRE

La radiazione elettromagnetica solare X e UV che penetra nell'atmosfera terrestre cede energia alle particelle dei gas atmosferici che investe ionizzando atomi e molecole; ne risulta un gas elettricamente neutro ed altamente conduttore chiamato plasma ionosferico.

Una grandezza fondamentale che caratterizza un plasma è la concentrazione o densità elettronica o semplicemente densità (numero di elettroni per unità di volume), usualmente indicata con N , normalmente viene assunta come parametro descrittivo della ionosfera nel suo complesso. La Fig. 1 mostra, in termini largamente medi sia nel tempo che nello spazio, l'andamento di N con la quota evidenziando l'esistenza di una ripartizione dell'atmosfera in zone (D, E, F1 e F2) a diversa ionizzazione.

Una proprietà del plasma ionosferico, di grande interesse, è la sua capacità a deviare il percorso delle onde elettromagnetiche a radiofrequenza. Le onde incidenti perpendicolarmente su uno strato ionosferico aventi frequenza f uguale o minore di $9N^{0.5}$ non si propagano entro il plasma ma vengono riflesse all'indietro. In effetti la ionosfera è definita come la parte dell'alta atmosfera terrestre (per convenzione da 50 km di quota in su), in cui la densità elettronica è sufficientemente alta (in pratica oltre 10^3 el/cm^3) da dar luogo ad effetti elettromagnetici rilevabili.

La distribuzione della densità di elettroni con l'altezza h dal suolo e la sua dipendenza dalla posizione del Sole sull'orizzonte dell'osservatore non è facilmente sintetizzabile in termini analitici senza una o più ipotesi restrittive. Così Chapman nel 1939 ottenne una funzione matematica descrivente l'andamento della densità elettronica al variare della quota e dell'altezza del Sole sull'orizzonte.

La relativa complessità della funzione proposta da Chapman e la restrittività delle ipotesi che la condizionano giustificano l'ampio uso che si fa in pratica delle più svariate funzioni matematiche determinate empiricamente allo scopo di descrivere la densità in funzione della quota.

La relazione precedente è la relazione fondamentale per la determinazione sperimentale della densità del plasma ionosferico; possiamo scrivere: $N = 1,24 \cdot 10^{-2} f^2$, dove N indica il numero di elettroni per m^3 e f la frequenza in Hz.

In pratica per far questo si impiega la cosiddetta tecnica del radiosondaggio verticale che in poche parole può essere così descritta:

Un trasmettitore posto a terra invia verticalmente degli impulsi di onda radio della

durata di 50-100 microsecondi, facendo aumentare con continuità la frequenza f da 1 a circa 20 MHz. Finché lungo il percorso dell'onda non si supera la densità di riflessione l'onda si propaga, mentre non appena N eguaglia tale valore l'onda si riflette e quindi subito dopo un ricevitore posto sempre a terra segnala l'arrivo di un'eco. L'intervallo di tempo trascorso tra l'invio di un impulso e la ricezione dell'eco è chiamato tempo di ritardo e dipende dalla distribuzione della densità elettronica lungo il percorso dell'onda al di sotto dello strato riflettente. Appena f , aumentando, raggiunge e supera la frequenza critica, non si avranno più echi dallo strato.

Il prodotto tra la velocità della luce nel vuoto ed il semiritardo è la cosiddetta *altezza virtuale* dello strato riflettente, cioè l'altezza che risulterebbe per esso se durante tutto il suo percorso l'onda si propagasse alla velocità costante di 300 mila km/s. Il grafico che si ottiene riportando i ritardi in funzione delle rispettive frequenze di riflessione costituisce lo ionogramma (Fig. 2)

Quindi lo ionogramma permette di dedurre immediatamente la densità elettronica di uno strato ma da esso non si può facilmente risalire alla quota dello strato riflettente in quanto le altezze virtuali ($h'v$) risultano essere molto differenti dalle corrispondenti altezze reali.

L'apparato elettronico che esegue il radiosondaggio e costruisce automaticamente lo ionogramma è chiamato ionosonda. Senza entrare nei dettagli, per i quali si rimanda alla bibliografia, diciamo solo che per ogni strato la frequenza critica è individuata sullo ionogramma da una cuspidè per gli strati D, E ed F1 o da un asintoto verticale per lo strato F2 e regione F notturna.

Questa tecnica è simile a quella correntemente applicata nei procedimenti LIDAR per rilevare le tracce di atomi metallici disciolti nella media atmosfera. Solo che il LIDAR impiegando radiazione visibile o ultravioletta, il cui tragitto non è influenzato dall'atmosfera, essenzialmente restituisce il grafico della intensità della radiazione diffusa verso il basso in funzione dell'altezza reale dello strato riflettente; pone quindi un problema, per così dire, inverso a quello della ionosonda e cioè la determinazione della densità degli elementi riflettenti ma non della loro quota.

La traduzione dello ionogramma nel corrispondente grafico densità-altezza reale costituisce il processo della inversione dello ionogramma si tratta di un arduo problema matematico non ancora esattamente risolto.

APPLICAZIONE ALLA RADIOPROPAGAZIONE

Lo studio ed il rilievo continuo delle proprietà e del comportamento della ionosfera è importante non soltanto per motivi scientifici e speculativi ma anche per il fatto che la riflessione ionosferica di onde radio viene correntemente sfruttata nei radiocollegamenti a grande distanza con onde corte e medie. I raggi dell'onda emessa dall'antenna trasmittente entro un certo settore dalla verticale vengono riflessi dalla ionosfera e ritornano al

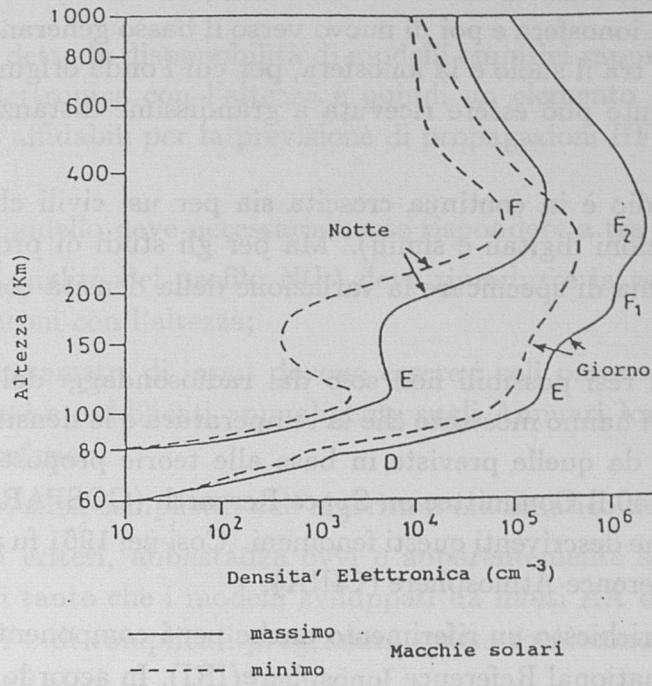


Fig. 1. - Profili tipici della densità elettronica.

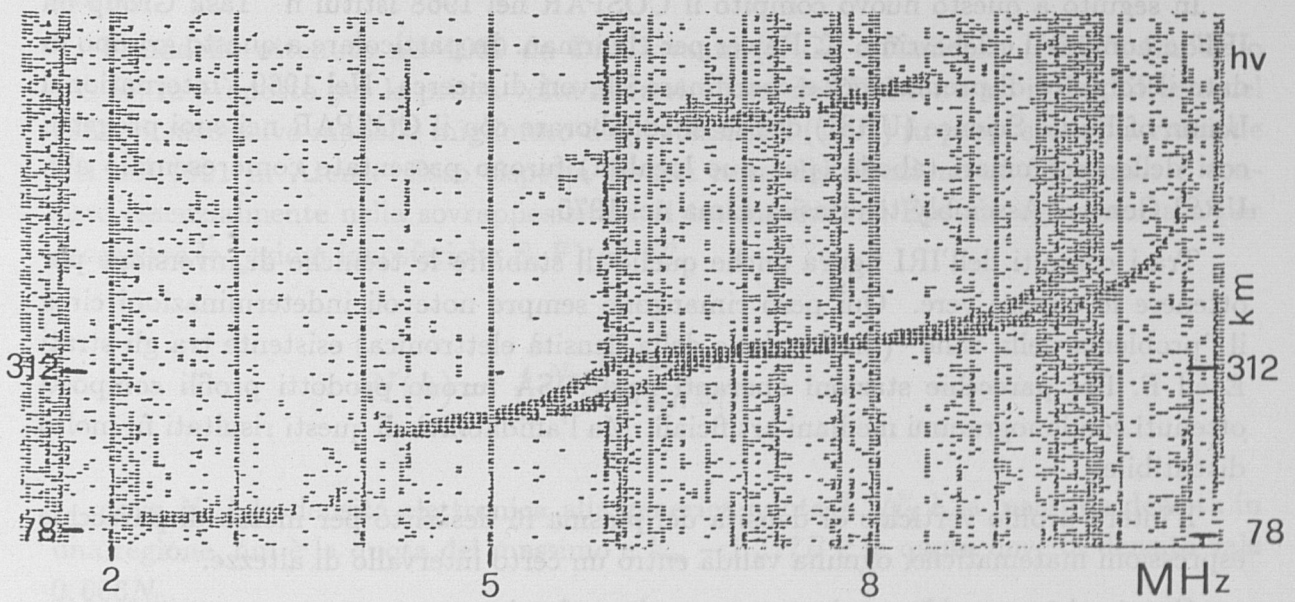


Fig. 2. - Ionogramma di un giorno quieto a medie latitudini.

suolo, dove possono essere captati da un ricevitore o subire una riflessione anche battendo sul suolo, ritornare nella ionosfera e poi di nuovo verso il basso generando così un processo di riflessioni multiple tra il suolo e la ionosfera, per cui l'onda originariamente emessa dall'antenna trasmittente può essere ricevuta a grandissime distanze su scala planetaria.

L'uso di comunicazioni radio è in continua crescita sia per usi civili che militari (voce, telex, radar, comunicazioni digitali e simili). Ma per gli studi di propagazione è essenziale risolvere il problema di specificare la variazione della densità con la quota cioè definire il "profilo $N(h)$ ".

I precisi risultati numerici resi possibili non solo dai radiosondaggi dal suolo ma anche da misurazioni satellitari hanno mostrato che la temperatura e la densità nell'alta atmosfera sono molto diverse da quelle previste in base alle teorie proposte. Fu per questo che alla fine degli anni 50 il Committee on Space Research (COSPAR) optò per la redazione di tabelle empiriche descrittive questi fenomeni. Così nel 1961 fu presentata la COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA).

Dopo il successo CIRA fu richiesto un riferimento anche per i componenti ionizzati dell'atmosfera chiamato International Reference Ionosphere (IRI). In accordo alla motivazione originale del CIRA, l'IRI consisteva in un insieme di tabelle empiriche descrittive i profili verticali mensili del plasma ionosferico.

In contrasto ai modelli teorici l'IRI si basa solo su indubbi risultati sperimentali senza alcuna dipendenza da ipotesi teoriche.

In seguito a questo nuovo compito il COSPAR nel 1968 istituì il "Task Group on IRI" e nominò il celeberrimo K. Rawer per chairman. In particolare a questo gruppo fu dato il compito di promuovere e coordinare i lavori di ricerca. Nel 1969 l'International Union of Radio Science (URSI) decise di collaborare con il COSPAR nei suoi progetti; così delle preliminari tabelle (per due località) furono presentate come esempio alla URSI General Assembly tenutasi a Lima nel 1975.

Tra i compiti dell'IRI figura anche quello di stabilire le tecniche di inversione per ottenere le altezze vere. Qui però rimangono sempre notevoli indeterminazioni circa il "problema della valle" (diminuzione della densità elettronica) esistente tra gli strati E ed F. Per parecchie stazioni operanti negli USA furono prodotti profili composti ottenuti con ionogrammi mediani artificiali. Ma l'affidabilità di questi risultati fu molto discutibile.

L'intero profilo verticale di densità del plasma fu descritto per mezzo di parecchie espressioni matematiche, ognuna valida entro un certo intervallo di altezze.

Questo sistema sebbene piuttosto complesso fornisce una corretta rappresentazione degli strati ma facilmente presenta il grave difetto della discontinuità della derivata.

Nel 1977 fu proposto l'uso della funzione analitica di P.S. Epstein. Questa fu usata con profitto nel descrivere la parte di profilo oltre il massimo dello strato F ma per varie ragioni, legate anche alla complessità del suo uso, non si poté applicarla all'intero

profilo.

Come detto, la disponibilità di modelli empirici rappresentativi delle variazioni della densità elettronica con l'altezza è quindi un elemento critico per lo studio di schemi pratici ed affidabili per la previsione di propagazioni HF e rimane tuttora un problema aperto.

Ogni modello deve necessariamente rispondere a tre requisiti basilari:

(1) la qualità del profilo $N(h)$ deve riprodurre la reale distribuzione della densità degli elettroni con l'altezza;

(2) i parametri di input devono essere i soli parametri rilevati routinamente dagli ionogrammi e pubblicati annualmente sugli Annuari Ionosferici editi da ogni Osservatorio Ionosferico;

(3) massima semplicità dell'algoritmo matematico impiegato.

Questi criteri, abbastanza ovvi e apparentemente semplici, risultano difficilmente associabili tanto che i modelli sviluppati da molti AA oltre a richiedere l'uso di grossi calcolatori e di complicati programmi spesso forniscono profili notevolmente differenti gli uni dagli altri.

In questo contesto l'Unità Organica Aeronomia collaborando con l'internatinal Centre for Theoretical Physics di Trieste ha posto tra i suoi obiettivi di ricerca, concomitanti con gli incarichi avuti in seno all'IRI, l'ottenimento di un modello matematico empirico di facile uso pratico ma anche rispondente il più possibile a fondamentali leggi fisiche.

Il modello ottenuto nel 1989 da Di Giovanni (ING) e Radicella (ICTP) (modello DG-R) fu proposto per la prima volta nella riunione dell'IRI tenutasi in Inghilterra nel 1989; il successivo modello migliorato dagli stessi AA (1991) fu proposto nella riunione IRI del 1991 in Atene. Esso rispetta la ben nota distribuzione di Chapman e consiste essenzialmente nella sovrapposizione di tre funzioni di Epstein ognuna usata per descrivere le regioni ionosferiche E, F1 ed F2.

$$N(h) = \frac{4 \cdot N_0 e^{(h-h_m)/B}}{[1 + e^{(h-h_m)/B}]^2}$$

dove N è la densità elettronica alla generica quota h , N_0 è la massima densità in una regione, h_m è la quota del massimo e $h_m - 1.317B$ è la quota dove la densità vale $0,666N_0$.

Questo modello si è rivelato molto utile nell'inversione degli ionogrammi. Infatti, produce risultati uguali o migliori di quelli ottenuti con il metodo dello strato parabolico.

La Fig.3 mostra il confronto tra alcuni profili DG-R e quelli forniti da altri metodi indipendenti.

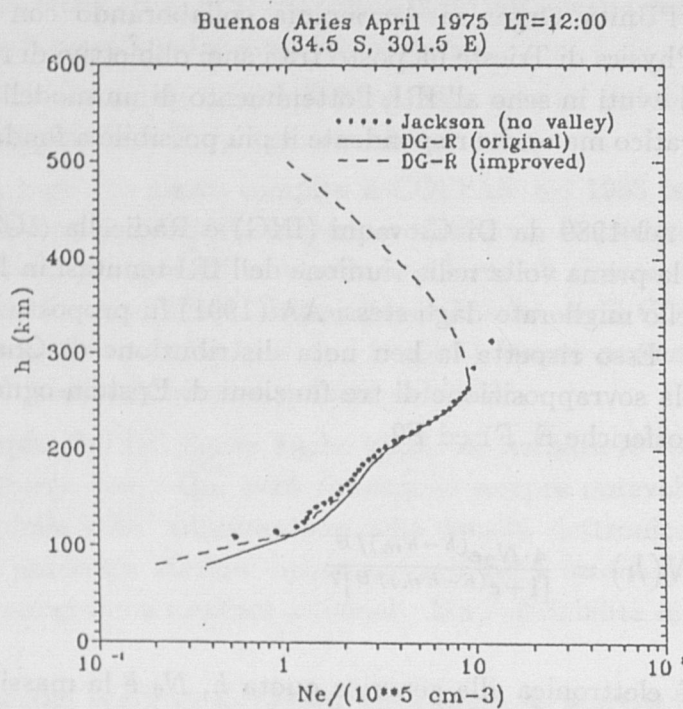
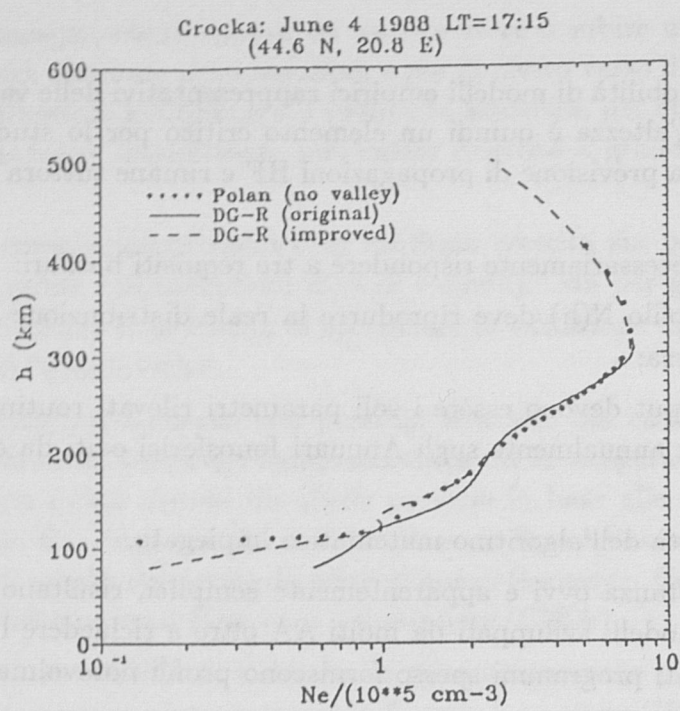


Fig. 3. - Modelli DG-R originale e migliorato sono paragonati con profili ottenuti da inversioni di ionogrammi, sia per l'emisfero nord che per l'emisfero sud.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

P. DOMINICI; (1972). Radiopropagazione Ionosferica, *Pubblicazioni ING, ROMA*.

K. DAVIES (1990). Ionospheric Radio, *Publ. Peter Peregrinus 1990 London* .

G. DI GIOVANNI, S. M. RADICELLA (1990). An analytical model of the electron density profile in the ionosphere, *Adv. Space Res. Vol.10 No.11*.