

Consiglio Nazionale delle Ricerche

**ISTITUTO DI ELABORAZIONE
DELLA INFORMAZIONE**

PISA

**Un monopolio a V resistivo come
sensore di campi elettromagnetici a
larga banda**

G. Manara, V. Procacci, E. Salerno

Nota Interna B4-50

dicembre 1993

Un Monopolo a V Resistivo come Sensore di Campi Elettromagnetici a Larga Banda

G. Manara¹, V. Procacci¹, E. Salerno²

¹ Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria della Informazione, Via Diotallevi, 2, I-56100, Pisa

² Istituto di Elaborazione della Informazione - CNR, Via Santa Maria, 46, I-56100, Pisa

Sommario: In questa nota sono descritti la modellizzazione elettromagnetica ed il progetto di un'antenna a larghissima banda, atta ad essere sfruttata come sensore di campi elettromagnetici in regime impulsivo, o comunque caratterizzati da estensioni di banda da qualche megahertz a qualche gigahertz. Idealmente, tale tipo di sensore presenta una sensibilità costante ed un ritardo di fase lineare su tutta la banda del segnale elettromagnetico da rivelare. Per la sua realizzazione si è scelto un monopolo a V descritto recentemente in letteratura, realizzato in materiale resistivo e caratterizzato da una larga banda di funzionamento e da una buona sensibilità. Il progetto realizzativo è preceduto dalla verifica numerica delle prestazioni effettivamente raggiungibili. Un sensore di questo tipo potrebbe essere utile nelle misure di compatibilità elettromagnetica ed in tutte quelle applicazioni diagnostiche a microonde, che si fanno sempre più diffuse, in cui debbano essere misurati accuratamente segnali caratterizzati da livello relativamente basso e larga banda relativa.

1. Introduzione

In un numero sempre crescente di applicazioni, si presenta l'esigenza di valutare l'andamento temporale di valori di campo elettromagnetico in regime transitorio o comunque rapidamente variabile e con contenuto frequenziale estremamente esteso. Un tipico esempio di questa esigenza è la misura dei campi irradiati da apparecchiature elettroniche per studi e/o verifiche di rispondenza alle normative nel campo della compatibilità elettromagnetica [1]. L'esigenza di misure di campo elettromagnetico a larga banda in spazio libero può anche presentarsi in diverse applicazioni non convenzionali delle microonde, che negli ultimi anni stanno ricevendo un forte impulso e cominciano ad uscire dall'ambito delle ricerche teoriche e di

laboratorio per trovare impieghi pratici nelle effettive realtà industriali, scientifiche e mediche. Un esempio significativo è certamente la tomografia diffrattiva elettromagnetica, studiata già da un decennio presso l'IEI-CNR [2]. In special modo per le misure in regime transitorio, risulta assolutamente indispensabile disporre di sensori a banda sufficientemente larga e sensibilità adeguata per la valutazione accurata dell'andamento temporale dei segnali. È stato dimostrato [3, 4] che un dipolo perfettamente conduttore terminato con un carico resistivo di alto valore presenta una notevole larghezza di banda, il cui limite superiore, però, è solo una frazione della frequenza di risonanza più bassa. Per questo motivo l'utilità di tali antenne è limitata ad impulsi molto più lunghi del tempo caratteristico dell'antenna. Per ricevere senza distorsioni impulsi con durate di frazioni di nanosecondo, tali antenne devono essere molto piccole. D'altra parte quest'ultima caratteristica fa sì che esse presentino una bassa sensibilità.

Per eliminare le caratteristiche risonanti dell'antenna e così estendere la banda a frequenze più alte, possono essere impiegati elementi dissipativi concentrati o distribuiti [5, 6]. Un esempio di ciò è il dipolo verticale non riflettente proposto da Wu e King [7]. Tale dipolo, che presenta una resistenza per unità di lunghezza sull'antenna funzione della distanza da una sua estremità, pur avendo una sensibilità maggiore rispetto ad un dipolo verticale connesso con un carico di impedenza bassa, ha una larghezza di banda minore [8].

È stato peraltro dimostrato [9] che i dipoli a V perfettamente conduttori hanno delle prestazioni migliori, in termini di sensibilità e larghezza di banda, rispetto ai convenzionali dipoli elettricamente corti. Le limitazioni di impiego di tali antenne sono imputabili alle riflessioni che si hanno all'estremità libera, che riducono la larghezza di banda. Tale effetto può essere eliminato, così come accade per il dipolo di Wu e King, caricando l'antenna con una resistenza distribuita in maniera rastremata (*tapered distributed resistance*) [10]. Così facendo si riesce a migliorare la risposta dell'antenna alle basse frequenze.

Diamo ora una sommaria descrizione della presente nota. Al Paragrafo 2, sono mostrati i risultati di una simulazione numerica con il metodo dei momenti, per mezzo della quale sono state ricavate le caratteristiche di impedenza di ingresso, sensibilità, altezza efficace e diagramma di radiazione di due particolari monopoli a V resistivi al variare della frequenza di lavoro. Al Paragrafo 3, è descritta una possibilità di realizzazione di uno di tali monopoli, che appare sufficientemente semplice e di basso costo.

2. Analisi e simulazione elettromagnetica dell'antenna

L'antenna qui presa in considerazione è un monopolo a V realizzato con un conduttore a resistenza distribuita variabile e posto su un piano di massa. La resistenza per unità di lunghezza del monopolo, a distanza s dall'estremità connessa al piano di massa, è data da [7, 11]:

$$r(s) = \frac{r(0)l}{l-s} \quad (1)$$

dove l è la lunghezza del monopolo ed $r(0)$ è la resistenza distribuita all'estremo vincolato dell'antenna.

Seguendo la strada indicata in [11] e [12], si è proceduto alla simulazione elettromagnetica del monopolo a V in questione. Per questa analisi in frequenza ci si è basati su un codice numerico che sfrutta il Metodo dei Momenti, con funzioni di base del tipo seno-coseno-costante e funzioni peso a delta di Dirac. Una rassegna sulle varie formulazioni del Metodo dei Momenti e sul software disponibile si trova in [13]. È stato considerato un monopolo a V lungo 30 cm, con 2 mm di diametro e posto su un piano di massa illimitato e perfettamente conduttore, in modo da formare con esso un angolo di 15° . Il valore ottimale di $r(0)$ nella relazione (1) è da determinare in modo da produrre un andamento il più regolare possibile delle curve della resistenza e della reattanza d'ingresso dell'antenna. Tale valore ottimale, determinato utilizzando il simulatore numerico, è risultato essere $1.5 \text{ k}\Omega/\text{m}$, lo stesso proposto da Esselle e Stuchly in [11].

Per simulare la distribuzione di resistenza lungo il dipolo, si è scelto di caricare ogni segmento in cui tale dipolo viene scomposto utilizzando il metodo dei momenti con una resistenza pari al valore assunto da $r(s)$ nel punto centrale del segmento stesso moltiplicato per la sua lunghezza. Si sono presentate due esigenze contrastanti: da una parte, quella di aumentare quanto più possibile il numero di segmenti in cui suddividere il monopolo, al fine di soddisfare con maggiore accuratezza la (1); dall'altra, quella di limitare il numero di segmenti per rimanere nell'ambito di validità dell'approssimazione di filo sottile, che richiede che la lunghezza dei segmenti sia sempre sufficientemente maggiore del raggio del filo. Il numero ottimale di segmenti è risultato essere 15. Una volta assegnato ad ogni segmento il proprio carico resistivo, si è provato a considerarlo sia distribuito che concentrato senza che si notassero apprezzabili variazioni nella resistenza d'ingresso, come d'altronde aveva già dimostrato Taylor per via analitica [14]. Si è

dunque optato per i carichi concentrati, che il simulatore pone al centro di ogni segmento. La stessa simulazione è stata fatta per un altro monopolo, avente le stesse caratteristiche di quello ora descritto, ma con una lunghezza di 20 cm. Stavolta, seguendo gli stessi criteri già esposti, il monopolo è stato suddiviso in 10 segmenti e si scelto un valore di $r(0)$ di 2.1 k Ω /m.

TABELLA 1
Resistenza di carico per ogni segmento (Ω)

	monopolo lungo 20 cm	monopolo lungo 30 cm
R ₁	42	30
R ₂	47.3	32.3
R ₃	54	35
R ₄	63	38.2
R ₅	75.6	42
R ₆	94.5	46.7
R ₇	126	52.5
R ₈	189	60
R ₉	378	70
R ₁₀	2000	84
R ₁₁		105
R ₁₂		140
R ₁₃		210
R ₁₄		420
R ₁₅		2000

I valori delle resistenze concentrate da applicare ai segmenti in cui si suddividono i due monopoli sono riportati in Tabella 1. La resistenza per unità di lunghezza all'estremità libera del monopolo dovrebbe essere, in base alla (1), di valore infinito. In pratica, per entrambi i monopoli, è risultato adatto un carico resistivo di 2000 Ω concentrato al centro dell'ultimo segmento; si può osservare che valori maggiori di resistenza provocano un grosso "ripple" tra i 20 e i 100 MHz nella curva della resistenza d'ingresso.

Passiamo adesso all'analisi elettromagnetica dei due monopoli sopra descritti, con lo scopo di determinarne le caratteristiche al variare della frequenza di lavoro.

2.1 Monopolo di lunghezza 20 cm

La geometria analizzata è illustrata in Fig. 1. La resistenza e la reattanza d'ingresso di questa antenna in funzione della frequenza sono graficate in Fig. 2. Alle basse frequenze l'antenna può essere rappresentata da una resistenza quasi costante di circa 230Ω e da un condensatore di 2.6 pF . La reattanza comincia a diventare induttiva a circa 2.2 GHz ed è quindi fino a tale frequenza che l'antenna è stata analizzata.

Per la frequenza inferiore si è fatto riferimento al già citato studio di Esselle e Stuchly [11] che la pone a 20 MHz . La Fig. 3 mostra l'andamento in frequenza dell'altezza efficace dell'antenna. Come possiamo vedere, essa è praticamente costante alle basse frequenze, come naturale per antenne elettricamente corte, per poi decrescere lentamente alle frequenze più alte.

Consideriamo un'onda piana uniforme incidente sull'antenna in direzione frontale, come in Fig. 1. Detta E_i la componente del campo elettrico incidente sul piano del monopolo e V_L la tensione ai morsetti del monopolo stesso, definiamo la funzione di trasferimento dell'antenna come:

$$R(\omega) = \frac{V_L(\omega)}{E_i(\omega)} \quad (2)$$

Per sagomare la risposta in frequenza dell'antenna possiamo aggiungere una semplice rete di adattamento costituita da un resistore R_a ed un condensatore C_a . Detta infine R_p la resistenza d'ingresso di un cavo adattato collegato al monopolo, si ottiene lo schema elettrico di Fig. 1. Se il monopolo a V è collegato direttamente al cavo adattato a 50Ω , senza cioè la rete di adattamento, la funzione di trasferimento in ricezione sarà quella mostrata in Fig. 4. Come si può vedere, la banda passante dell'antenna si estende da circa 160 MHz ad almeno 2.2 GHz . Consideriamo adesso l'antenna in presenza della sola capacità di adattamento C_a . Tale capacità esterna, insieme alla capacità d'ingresso del monopolo, costituisce un partitore capacitivo di tensione. La capacità C_a fa sentire il suo effetto in maniera dominante alle basse frequenze; a frequenze più alte, infatti, la capacità C_a cortocircuita i morsetti dell'antenna e così la risposta tende a zero. Se invece consideriamo l'antenna in presenza della sola resistenza di adattamento R_a , si avrà una risposta utile solo a frequenze maggiori. Combinando tali effetti si ottiene una serie RC con la quale si riesce a sagomare $R(\omega)$. Per avvicinare il più possibile la risposta alle basse ed alte frequenze, si possono scegliere op-

portuni valori per i componenti, che nel nostro caso sono risultati essere $R_a = 85 \Omega$ e $C_a = 7 \text{ pF}$. Gli andamenti del modulo della risposta in frequenza con solo R_a , solo C_a e con $R_a + C_a$ sono graficati in Fig. 5.

Consideriamo adesso l'effetto del cavo quando sia collegato all'antenna insieme alla rete di adattamento. La resistenza di ingresso R_p del cavo adattato influisce sul limite inferiore di banda. Le variazioni indotte sul modulo della funzione di trasferimento possono essere minimizzate regolando la capacità C_a , che è stata scelta di valore 3 pF . I risultati numerici così ottimizzati sono riportati nelle Figg. 6 e 7, che mostrano rispettivamente il modulo e la fase di $R(\omega)$. Se ne deduce che si può ottenere una larghezza di banda che va da circa 85 MHz ad almeno 2.2 GHz con una sensibilità di circa $2 \text{ mV}/(\text{Vm}^{-1})$. Da ciò si può affermare che questa antenna è in grado di ricevere impulsi elettromagnetici in banda base grosso modo di durata compresa tra 460 ps e 11.5 ns .

Di questa antenna sono anche stati calcolati i diagrammi di irradiazione per varie frequenze. In Fig. 8 sono presentati i diagrammi di irradiazione sul piano verticale contenente il monopolo, per frequenze di $100, 740, 1300$ e 2020 MHz . Nelle Figg. 9-14 sono invece riportati i diagrammi di irradiazione calcolati sul piano orizzontale. Come possiamo vedere, alle basse frequenze l'antenna irradia quasi isotropicamente sul piano orizzontale, mentre all'aumentare della frequenza l'intensità di radiazione diventa sempre più marcata nella direzione frontale del monopolo.

2.2 Monopolo di lunghezza 30 cm

Per il monopolo di 30 cm valgono le stesse considerazioni generali espresse per il monopolo di 20 cm , con le seguenti differenze e precisazioni. Alle basse frequenze l'antenna può essere rappresentata da una resistenza quasi costante di circa 236Ω e da un condensatore di 3.6 pF (Fig. 15). Anche in questo caso la reattanza comincia a diventare induttiva a circa 2.2 GHz e quindi la frequenza massima di analisi è rimasta invariata.

La Fig. 16 mostra l'altezza efficace dell'antenna, che ovviamente parte da un valore maggiore (23.5 mm) rispetto al caso precedente (15.5 mm), ma presenta un andamento simile.

Abbiamo poi le curve della risposta in frequenza $R(\omega)$ calcolate nelle stesse condizioni del caso precedente. La Fig. 17 mostra il modulo della risposta in frequenza nel caso in cui l'antenna sia direttamente collegata al cavo adattato a 50Ω , senza cioè la rete di adattamento. Se ne può dedurre un limite inferiore di banda di circa 100 MHz . Gli andamenti di $|R(\omega)|$ con solo

R_a , solo C_a e con R_a+C_a sono graficati in Fig. 18. Per questo caso sono stati scelti i valori di $R_a=95 \Omega$ e di $C_a=9 \text{ pF}$.

Consideriamo adesso l'effetto del cavo quando sia collegato all'antenna insieme alla rete di adattamento. La resistenza d'ingresso R_p del cavo adattato influisce sul limite inferiore di banda. Per minimizzare le variazioni indotte su $|R(\omega)|$ dalla resistenza R_p del cavo adattato, si può intervenire regolando la capacità C_a , che è stata scelta di valore 4 pF . I risultati numerici così ottimizzati sono riportati nelle Figg. 19 e 20, che mostrano rispettivamente il modulo e la fase di $R(\omega)$. Se ne deduce che si può ottenere una larghezza di banda che va da circa 65 MHz ad almeno 2.2 GHz ed una sensibilità di circa $3 \text{ mV}/(\text{Vm}^{-1})$

Anche il monopolo lungo 30 cm è dunque potenzialmente in grado di ricevere impulsi elettromagnetici in banda base di durata non minore di 460 ps . Per le sue caratteristiche a bassa frequenza, consente inoltre di fare misure per una durata massima di circa 15 ns .

Anche per questa antenna sono stati calcolati i diagrammi di irradiazione sul piano orizzontale per varie frequenze (Figg. 21-26). Gli andamenti ottenuti risultano pressoché simili a quelli ricavati nel caso precedente. L'unica sostanziale differenza è la maggiore intensità di radiazione.

3. Progetto dell'antenna a larga banda

Dopo la simulazione elettromagnetica, si passa ora alla fase di progetto realizzativo dell'antenna. Sono state prese in considerazione diverse metodologie realizzative ed infine, a causa della difficoltà di produrre una resistenza distribuita variabile secondo la (1), si è deciso di realizzarla mediante una tecnica di evaporazione sotto vuoto. Tale tecnica consiste nel depositare un *film* sottile di una opportuna lega conduttrice su un substrato dielettrico. La conducibilità variabile del monopolo può così essere ottenuta in due modi, e cioè mediante modulazione in larghezza o in spessore del film sottile. Si è optato per la prima alternativa, che consente di intervenire più facilmente sul profilo ottenuto, nel caso in cui si rendano necessarie modifiche.

Prenderemo qui in considerazione il caso del monopolo lungo 20 cm , in quanto una minore lunghezza della parte in film sottile rende tecnologicamente più semplice il problema di ottenere una deposizione di spessore costante.

Come materiale conduttore si potrebbe utilizzare cromo puro, che presenta una resistività di $0.129 \mu\Omega\cdot\text{m}$ ed è facilmente reperibile. La nostra scelta è però caduta sul nichrome, una lega (65% nichel, 12% cromo, 23% ferro) che risulta più adatta per la sua maggior resistività di $1.123 \mu\Omega\cdot\text{m}$. Per il calcolo della resistenza di strato R_s sarebbe opportuno usare la formula di Van der Pauw [15]. In pratica si è fatto riferimento alle curve, calcolate da Baker [16], che esprimono R_s in funzione dello spessore del *film*. Depositando un *film* di nichrome dello spessore di 107 nm, si otterrà una resistenza di strato di circa $10.5 \Omega/\diamond$. Tale lega potrebbe essere depositata su un substrato di Kapton dello spessore di 1 mm. La distribuzione di resistenza data dalla (1) viene realizzata modulando linearmente la larghezza del *film* da 5 mm, ad una estremità del monopolo, fino a quasi zero all'altra estremità, così da ottenere un triangolo isoscele. Per ottenere una pista conduttrice così sagomata si ricorre al metodo della fotoincisione.

Il monopolo viene posto su un piano di massa, in modo che formi con esso un angolo di 15° . Il piano di massa può essere realizzato con una piastra di rame di dimensioni opportune. Per mantenere il monopolo in posizione ci si può avvalere di un cuneo di polistirolo sul quale viene incollato il substrato di Kapton.

Per quanto riguarda la rete di adattamento si è cercato di realizzarla in maniera essenziale, limitando per quanto possibile l'uso di fili di collegamento fra i componenti, al fine di evitare l'insorgenza di capacità parassite. Si è pensato ad un resistore a film sottile da 85Ω tipo NPC 100-200 W 85 2 della KDI/Triangle Electronics. Tale resistore, le cui caratteristiche geometriche sono illustrate in Fig. 27, ha una risposta costante fino a frequenze ben superiori alla nostra frequenza d'interesse.

Il progetto prevede poi un condensatore della capacità di 3 pF. In pratica si è preferito usare un *trimmer* capacitivo che copra un intervallo di valori compreso tra 0.5 a 8.5 pF, al fine di poter intervenire per gli eventuali aggiustamenti. Si è scelto il *trimmer* miniaturizzato di Fig. 28 (misure espresse in pollici), che ha il dielettrico in teflon e presenta una frequenza di risonanza superiore a 5 GHz. Si tratta del CPA10 della Voltronics Corporation.

Si è poi pensato di far uso di un connettore per portare, tramite un cavo adattato, il segnale ricevuto dall'antenna ad un oscilloscopio o ad un analizzatore di spettro. Il connettore scelto è del tipo SMA-F ed è il 5309-1CC della CDI. Le sue caratteristiche geometriche, con le misure espresse in pollici, sono mostrate in Fig. 29.

Come già detto, si è cercato di effettuare un montaggio dei componenti quanto più essenziale possibile. Il connettore è saldato alla parte inferiore del piano di massa, in modo da far fuoriuscire dall'altra parte il conduttore centrale attraverso un opportuno foro praticato sul piano stesso; si è preferito rinunciare a montarlo con le apposite viti per non dar luogo a possibili capacità parassite. Un terminale del resistore è saldato direttamente sul polo caldo del connettore, mentre l'altro terminale è saldato ad un terminale del trimmer capacitivo, che viene poi collegato al piano di massa tramite un filo di rame argentato. Il collegamento con l'antenna viene effettuato tramite un altro breve filo argentato (3-4 mm) che, per un capo, è saldato alla pista conduttrice sul bordo largo 5 mm, per l'altro al primo terminale del resistore (potrebbe anche essere collegato al polo caldo del connettore). Lo schema completo di montaggio dell'antenna è mostrato in Figura 30. Oltre che un costo contenuto, una soluzione del tipo di quella prospettata dovrebbe assicurare un limitato effetto delle capacità parassite.

4. Conclusioni

Abbiamo visto che si può ottenere un'antenna a larga banda utilizzando un monopolo a V realizzato con un conduttore a resistenza distribuita variabile. In particolare, è stato analizzato il comportamento in frequenza sulla banda 20 MHz-2.2 GHz di due monopoli a V, di lunghezza 20 cm e 30 cm. Per entrambi sono stati calcolati i diagrammi di irradiazione e gli andamenti in frequenza dell'impedenza d'ingresso e dell'altezza efficace. È stata poi calcolata la funzione di trasferimento delle due antenne in diverse condizioni di funzionamento. I valori dell'impedenza dei componenti della rete di adattamento sono stati ottimizzati al fine di ottenere una risposta dell'antenna costante su tutta la banda di interesse. Per il monopolo di lunghezza 20 cm, quando collegato alla rete di adattamento ed al cavo adattato, si è ottenuta una banda che va da 85 MHz a 2.2 GHz. Quest'antenna è dunque in grado di ricevere, senza rilevanti distorsioni, impulsi elettromagnetici in banda base della durata di 460 ps ed inoltre permette di effettuare misure per una durata di circa 11.5 ns. La sensibilità dell'antenna, che è di circa $2 \text{ mV}/(\text{Vm}^{-1})$, non subisce apprezzabili variazioni quando la direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica incidente varia entro 30° intorno alla direzione di massima irradiazione del monopolo. Si è poi descritto un primo progetto realizzativo dell'antenna lunga 20 cm, che prevede la realizzazione della resistenza distribuita variabile modulando in larghezza una pista in film sottile di nichrome.

Tale progetto ha il solo scopo di verificare la fattibilità tecnologica di un'antenna del tipo qui descritto, mentre ulteriori studi sarebbero utili per la caratterizzazione di questo tipo di antenna. Ad esempio, potrebbe essere interessante esaminare in simulazione le variazioni dell'impedenza d'ingresso e dei diagrammi di irradiazione al variare delle dimensioni del piano di massa; altresì interessante potrebbe essere lo studio delle prestazioni dell'antenna al variare dell'angolo formato dal monopolo col piano di massa.

5. Bibliografia

- [1] C.R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Wiley, 1992.
- [2] M. Bramanti, E. Salerno, "Electromagnetic Techniques for Nondestructive Testing of Dielectric Materials: Diffraction Tomography", *J. of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 27, No. 4, 1992, pp. 233-240.
- [3] C.E. Baum e altri, "Sensors for electromagnetic pulse measurements both inside and away from nuclear source regions", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-26, pp. 22-35, gennaio 1978.
- [4] A. Thansandote e altri, "A broadband E-field sensor", in *CPEM '90 Digest. Conf. on Prec. Electrom. Meas.*, pp. 410-411, Ottawa, Canada.
- [5] M. Kanda, "Transients in a resistively loaded loop antenna", in *Int. Symp. Electromagn. Compat. Dig.*, pp. 286-296, Tokyo, Giappone, 1984.
- [6] K.P. Esselle, S.S. Stuchly: "Resistively loaded loop as a pulse receiving antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-38, pp. 1123-1126, luglio 1990.
- [7] T. T. Wu, R. W. P. King, "The cylindrical antenna with non-reflecting resistive loading", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-13, pp. 369-373, maggio 1965. "Corrections", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-13, p. 998, novembre 1965.
- [8] M. Kanda, "A relatively short cylindrical broadband antenna with tapered resistive loading for picosecond pulse measurements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-26, pp. 439-447, maggio 1978.
- [9] H.M. Shen e altri, "New sensors for measuring very short electromagnetic pulses", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-38, pp. 838-846, giugno 1990.
- [10] K.P. Esselle, *Receiving antennas for electromagnetic pulses and transients*, Ph. D. dissertation, Univ. Ottawa, Canada 1990.
- [11] K. P. Esselle, S. S. Stuchly, "An electrically large antenna for transient electromagnetic field measurements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-40, No. 2, pp. 460-464, aprile 1991.
- [12] K.P. Esselle, S.S. Stuchly, "A broadband resistively loaded V-antenna: experimental results", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-39, No. 11, pp. 1587-1591, novembre 1991.

- [13] V. Procacci, "Progetto di un'antenna a larga banda per misure di campi elettromagnetici in regime impulsivo", tesi di laurea in Ingegneria Elettronica, Università di Pisa, a.a. 1991-1992.
- [14] C.D. Taylor, "Cylindrical transmitting antenna: tapered resistivity and multiple impedance loadings", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-16, No. 2, pp. 176-179, marzo 1968.
- [15] N.G. Einspruch e altri, *VLSI Electronics. Microstructure Science*, Vol. 15, Cap. 1, Academic Press, 1987.
- [16] D. Baker e altri, *Integrated device and connection technology*, Vol. 3, Cap. 2, Bell Telephone Laboratories, Prentice Hall, 1971.

Didascalie delle figure:

- 1) Schema dell'antenna analizzata.
- 2) Resistenza e reattanza di ingresso del monopolo lungo 20 cm, in funzione della frequenza.
- 3) Altezza efficace del monopolo lungo 20 cm in funzione della frequenza.
- 4) Risposta in frequenza del monopolo lungo 20 cm, direttamente connesso al cavo adattato.
- 5) Risposta in frequenza del monopolo lungo 20 cm con la sola rete di adattamento.
- 6) Modulo della risposta in frequenza del monopolo lungo 20 cm con rete di adattamento e cavo adattato.
- 7) Fase della risposta in frequenza del monopolo lungo 20 cm con rete di adattamento e cavo adattato.
- 8) Diagrammi di irradiazione sul piano verticale del monopolo lungo 20 cm per diverse frequenze di lavoro.
- 9)-14) Diagrammi di irradiazione sul piano orizzontale del monopolo lungo 20 cm per diverse frequenze di lavoro.
- 15) Resistenza e reattanza di ingresso del monopolo lungo 30 cm, in funzione della frequenza.
- 16) Altezza efficace del monopolo lungo 30 cm in funzione della frequenza.
- 17) Risposta in frequenza del monopolo lungo 30 cm, direttamente connesso al cavo adattato.
- 18) Risposta in frequenza del monopolo lungo 30 cm con la sola rete di adattamento.
- 19) Modulo della risposta in frequenza del monopolo lungo 30 cm con rete di adattamento e cavo adattato.
- 20) Fase della risposta in frequenza del monopolo lungo 30 cm con rete di adattamento e cavo adattato.
- 21)-26) Diagrammi di irradiazione sul piano orizzontale del monopolo lungo 30 cm per diverse frequenze di lavoro.
- 27) Geometria del resistore scelto per la rete di adattamento.
- 28) Trimmer capacitivo scelto per la rete di adattamento.
- 29) Connettore SMA-F.
- 30) Schema costruttivo del monopolo lungo 20 cm.

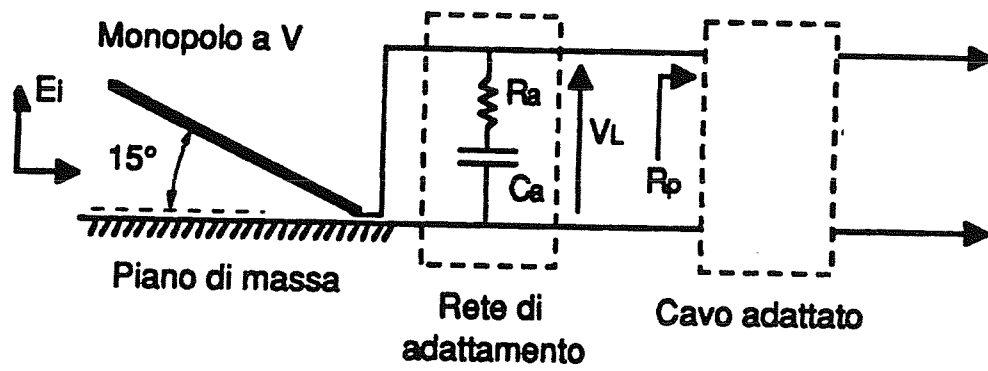


FIG. 1

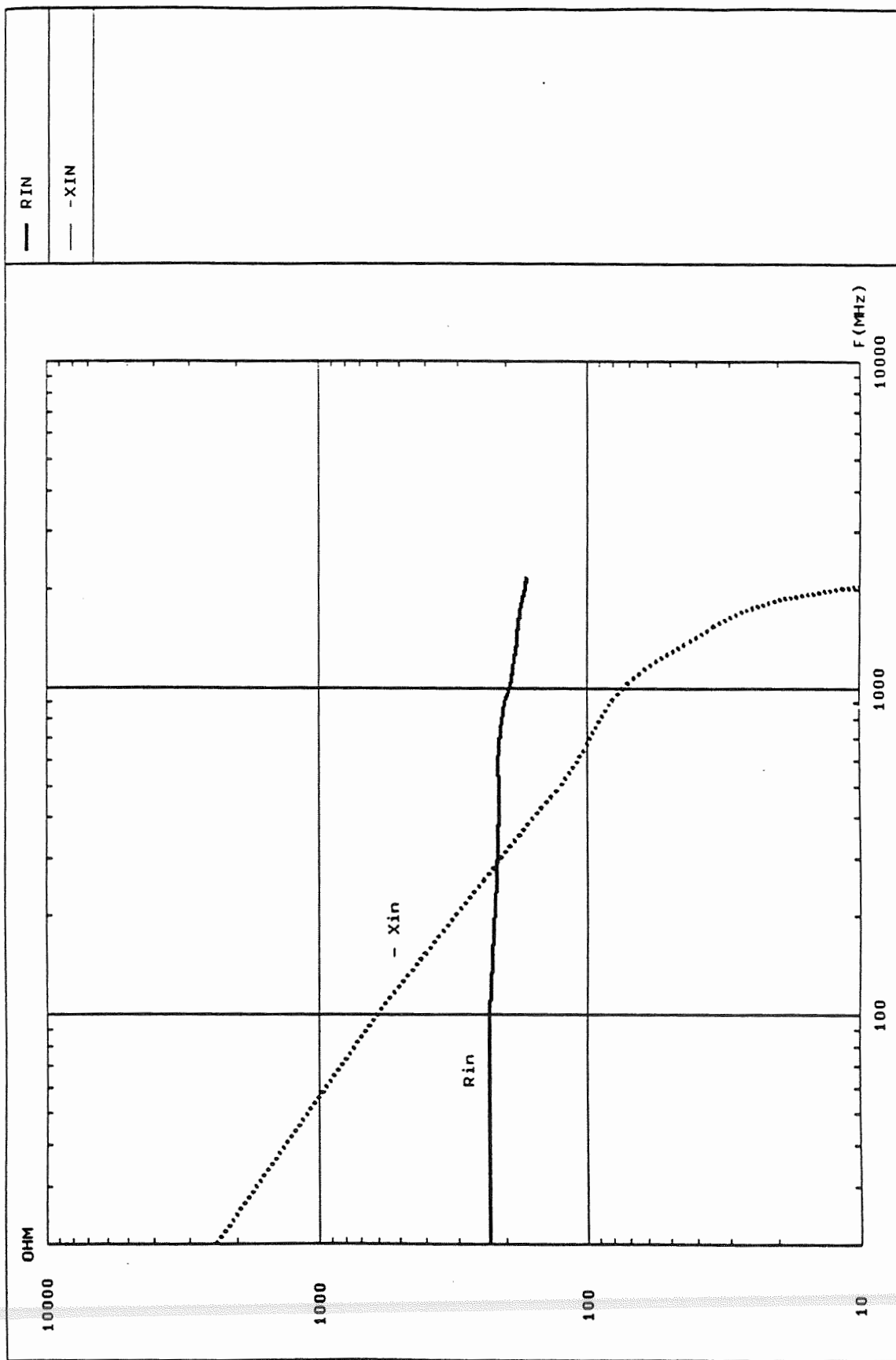
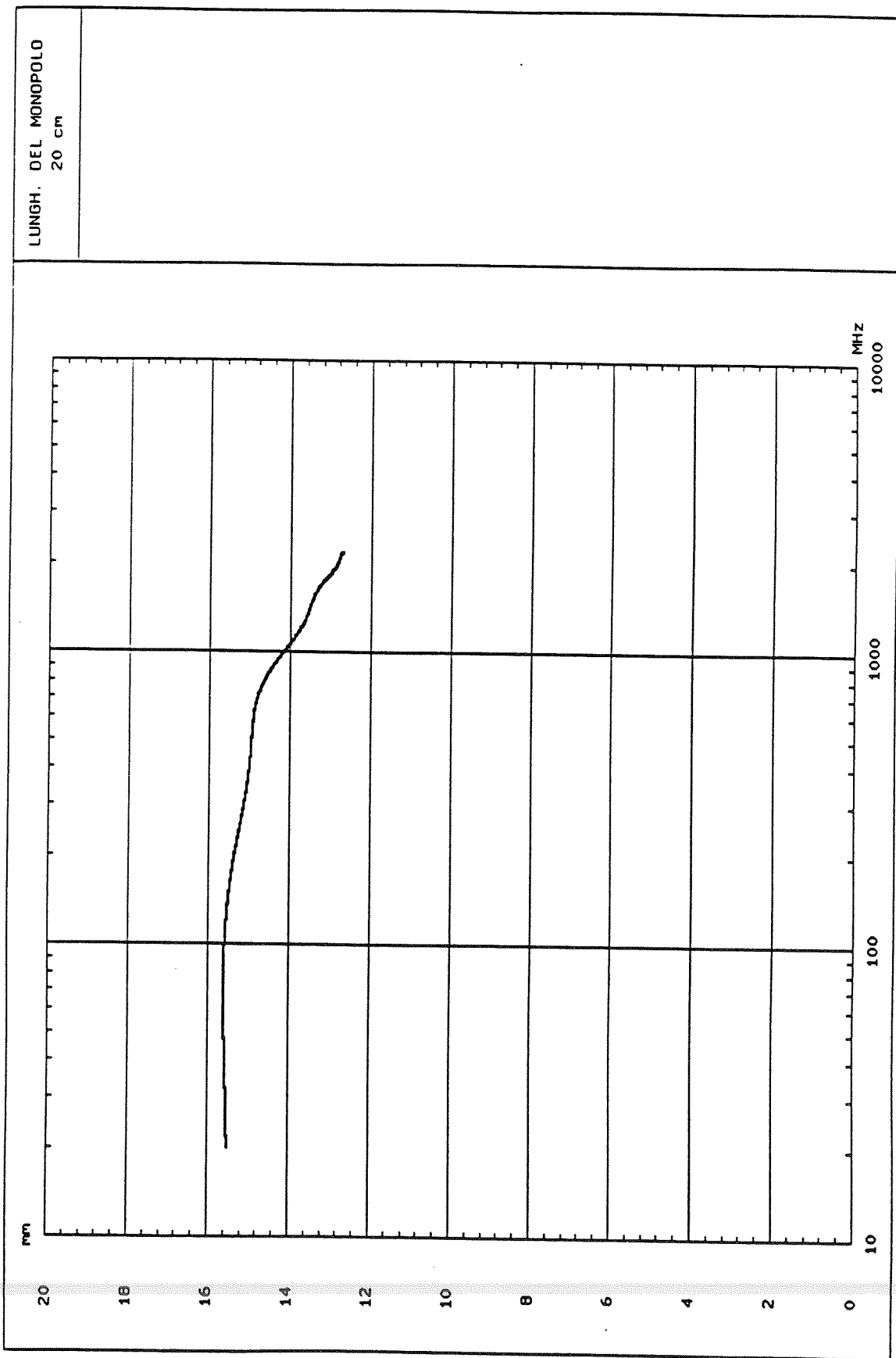


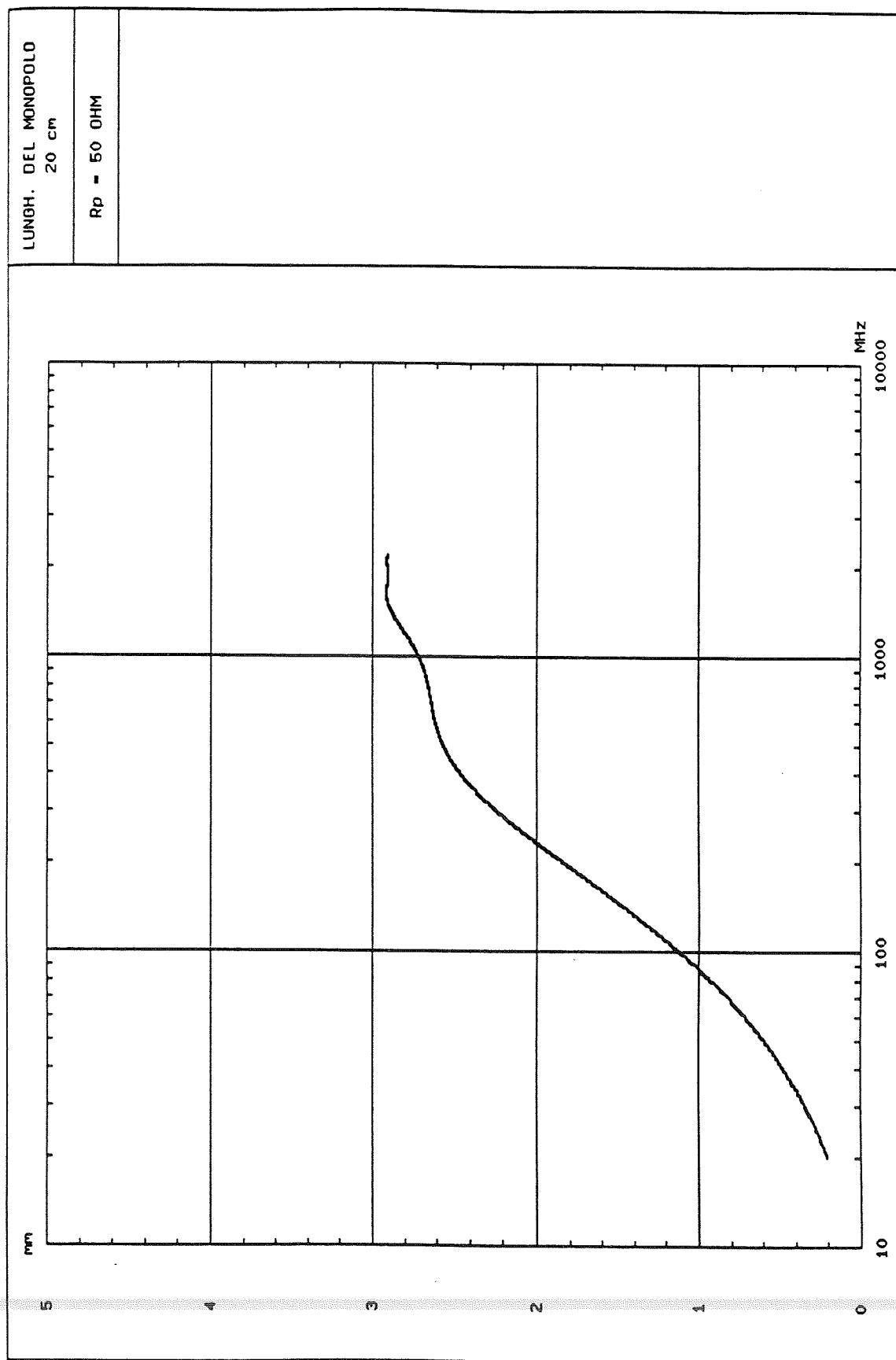
FIG. 2

Resistenza e Reattanza di ingresso del monopolo lungo 20 cm



Altezza efficace del monopolo a V in funzione della frequenza

FIG. 3



Modulo della risposta del monopolo a V in funzione della frequenza

FIG. 4

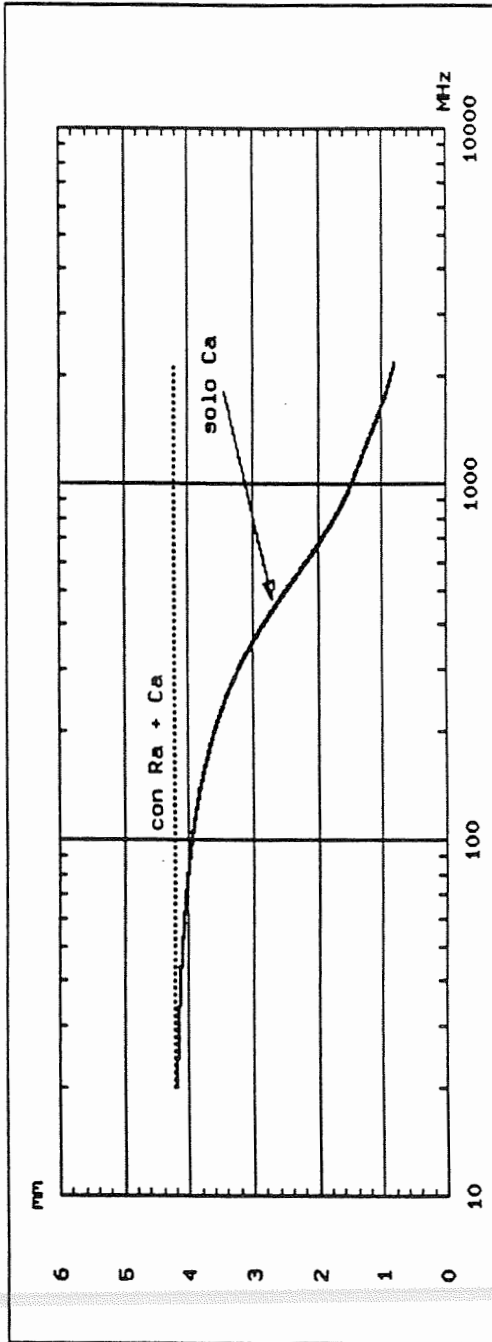
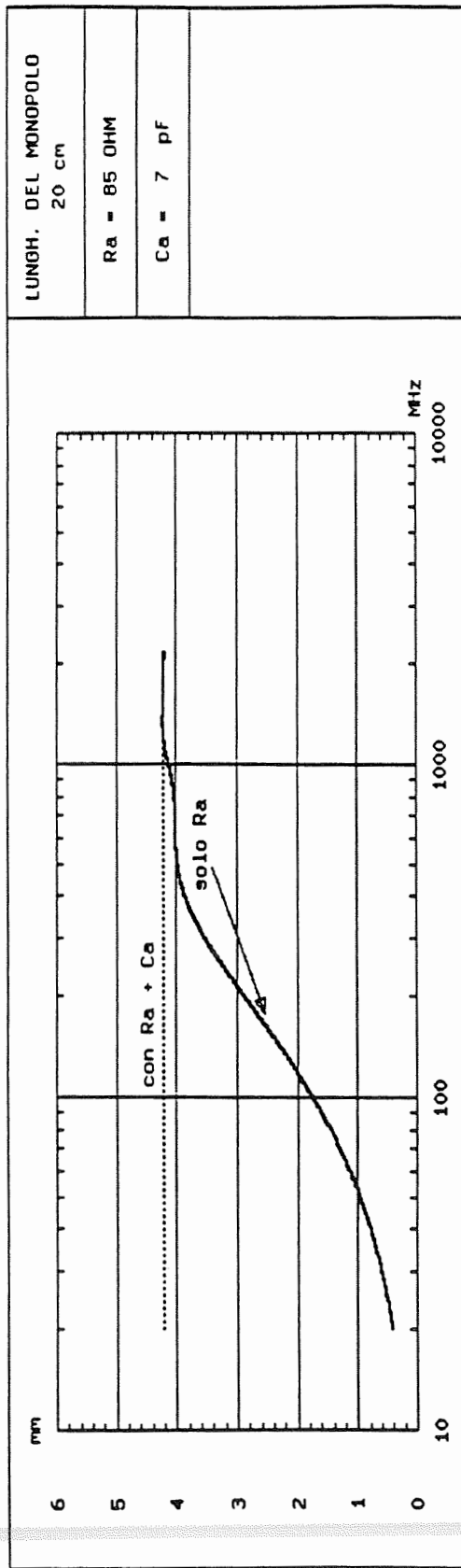
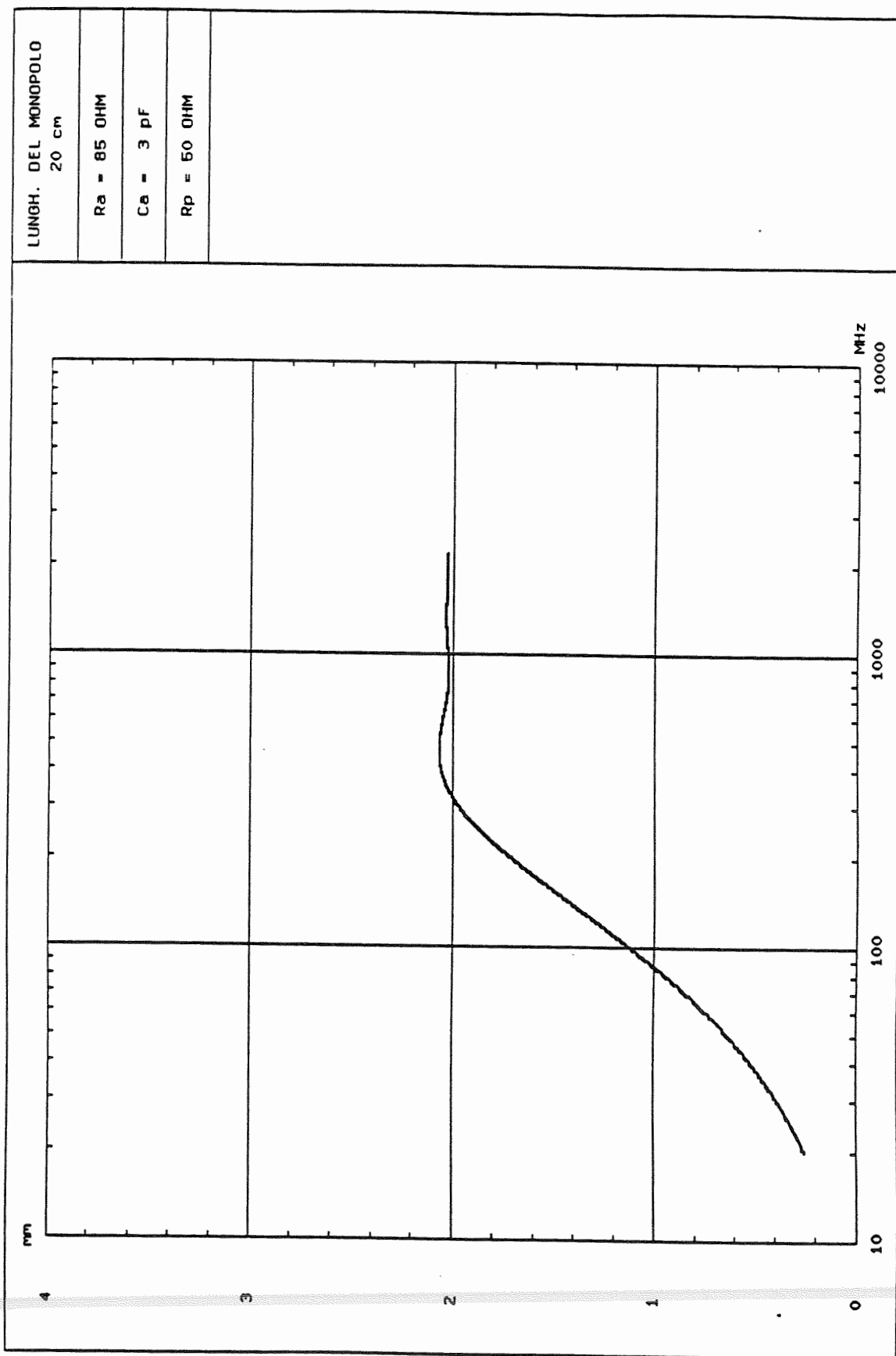


FIG. 5

Modulo della risposta in frequenza del monopolo a V



Modulo della risposta in frequenza del monopolo a V

FIG. 6

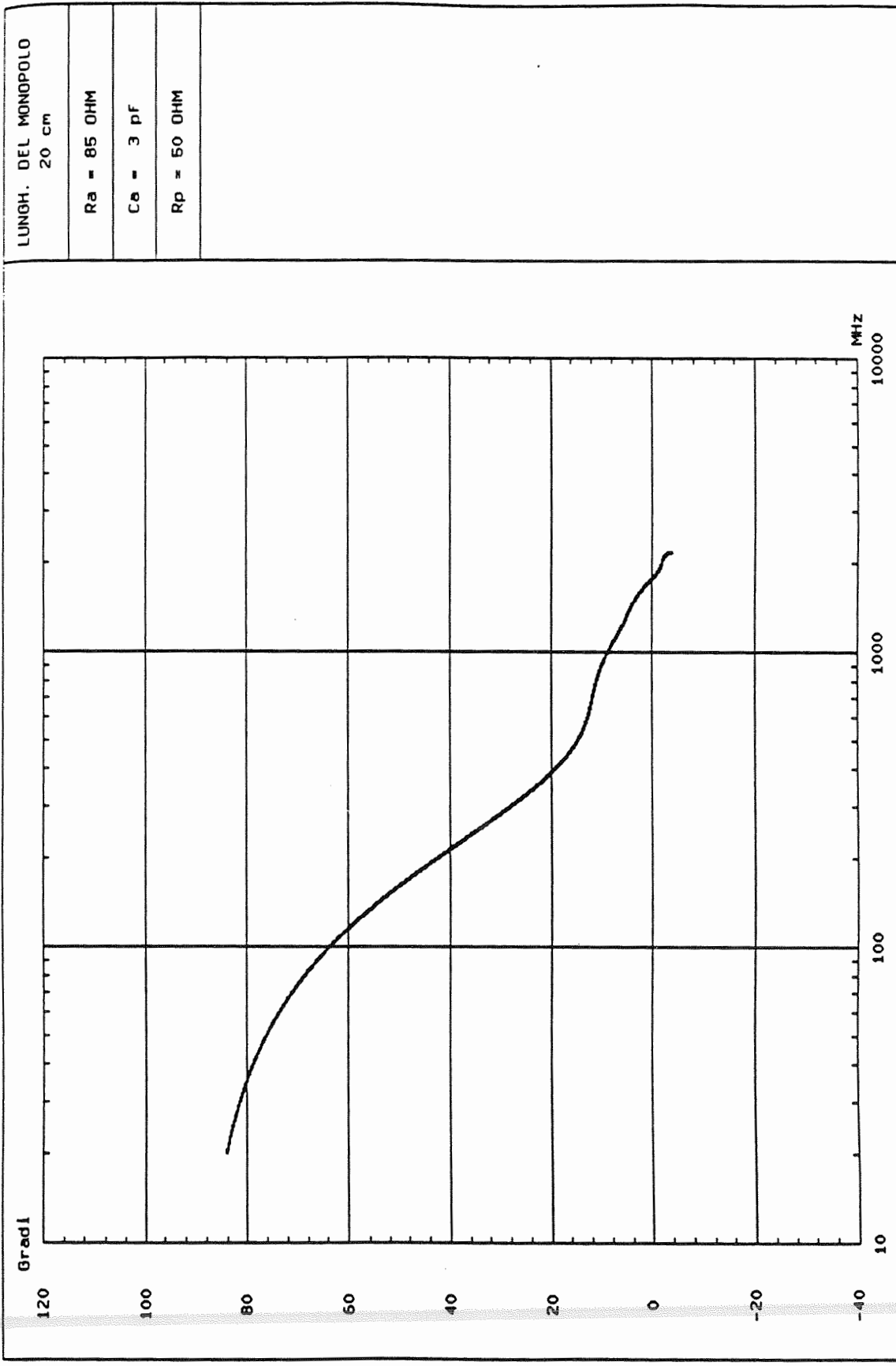
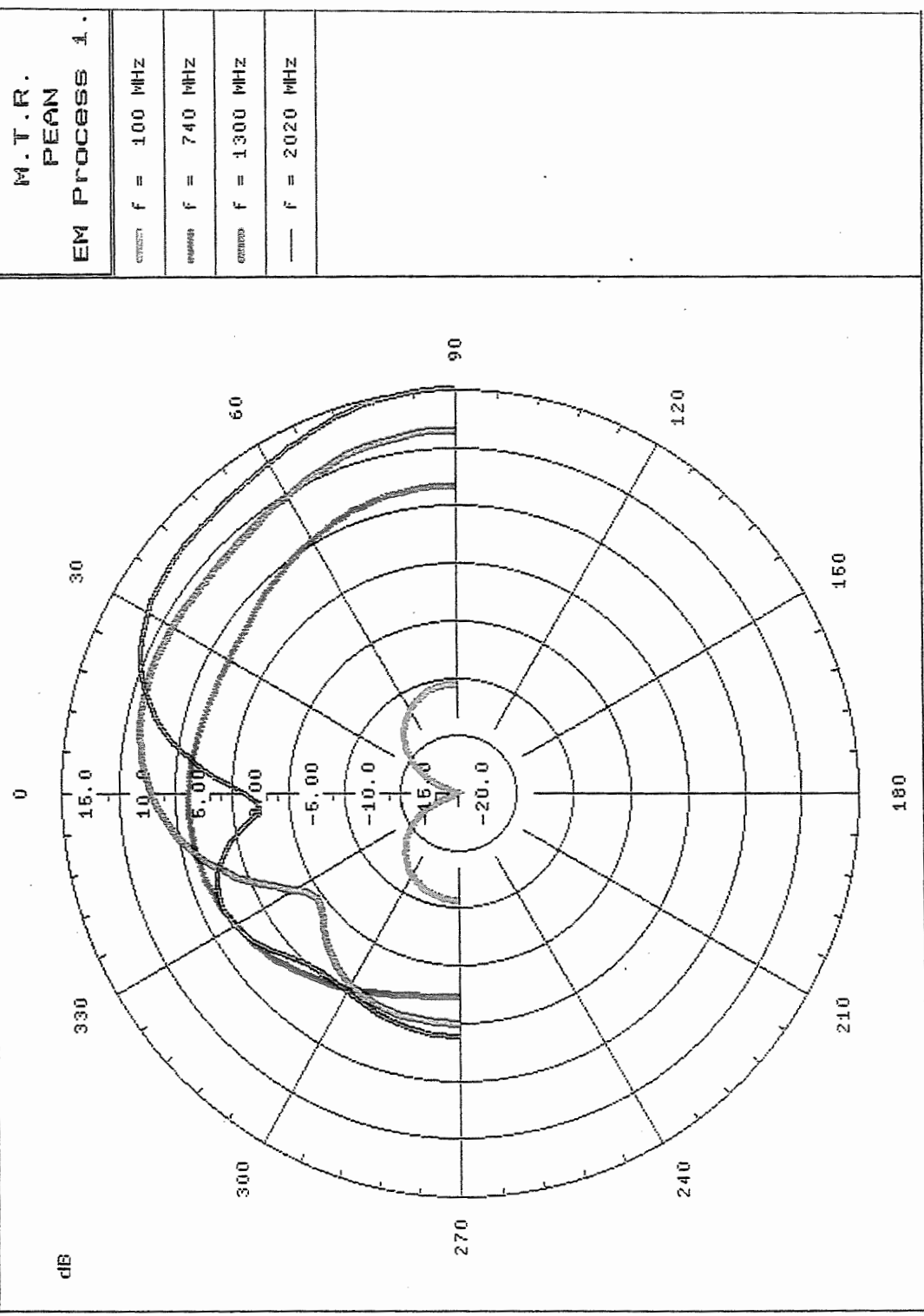


FIG. 7

Fase della risposta in frequenza del monopolo a V

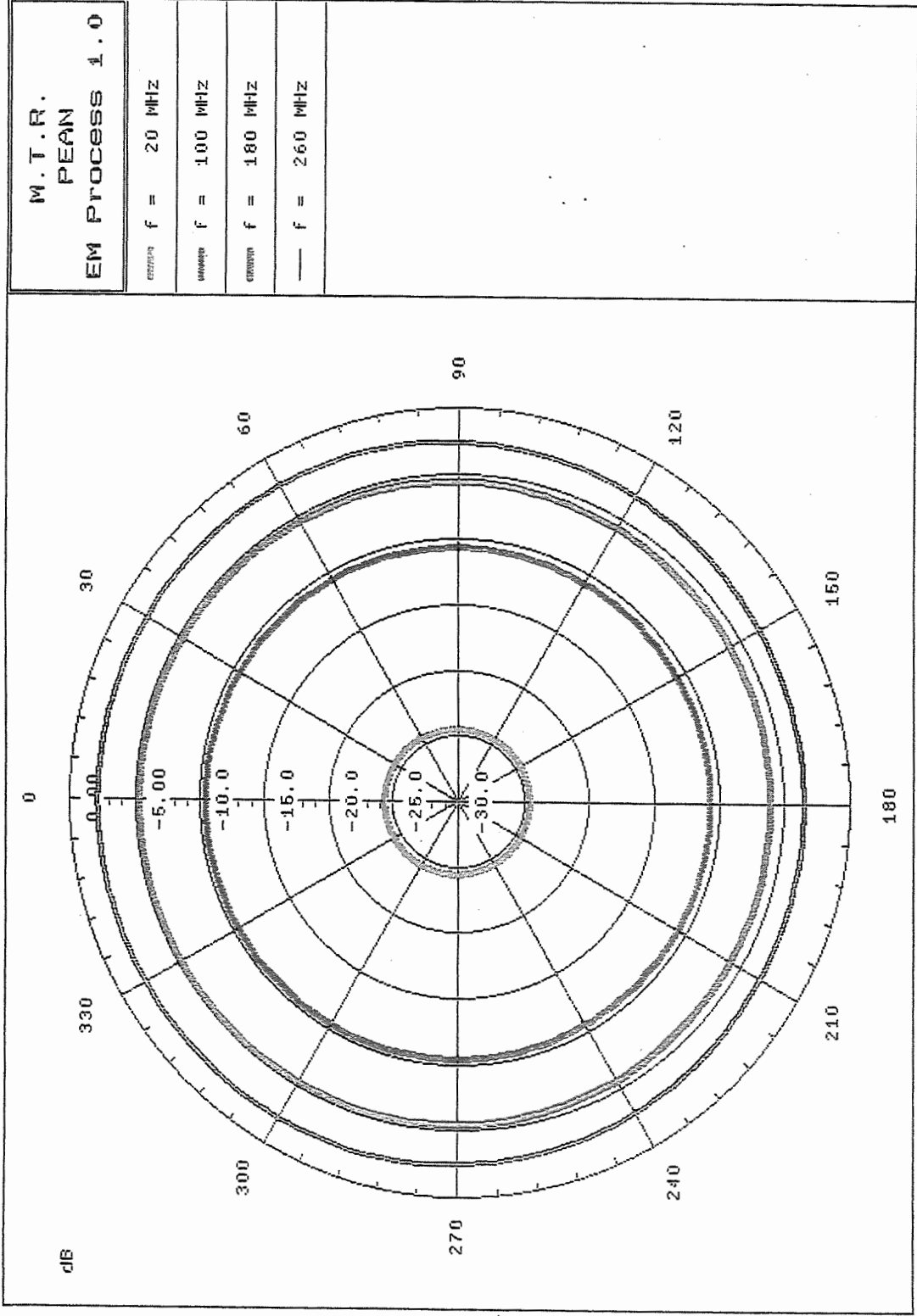
2-MAR-1993 14:56:4



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO VERTICALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 20 CM

FIG. 8

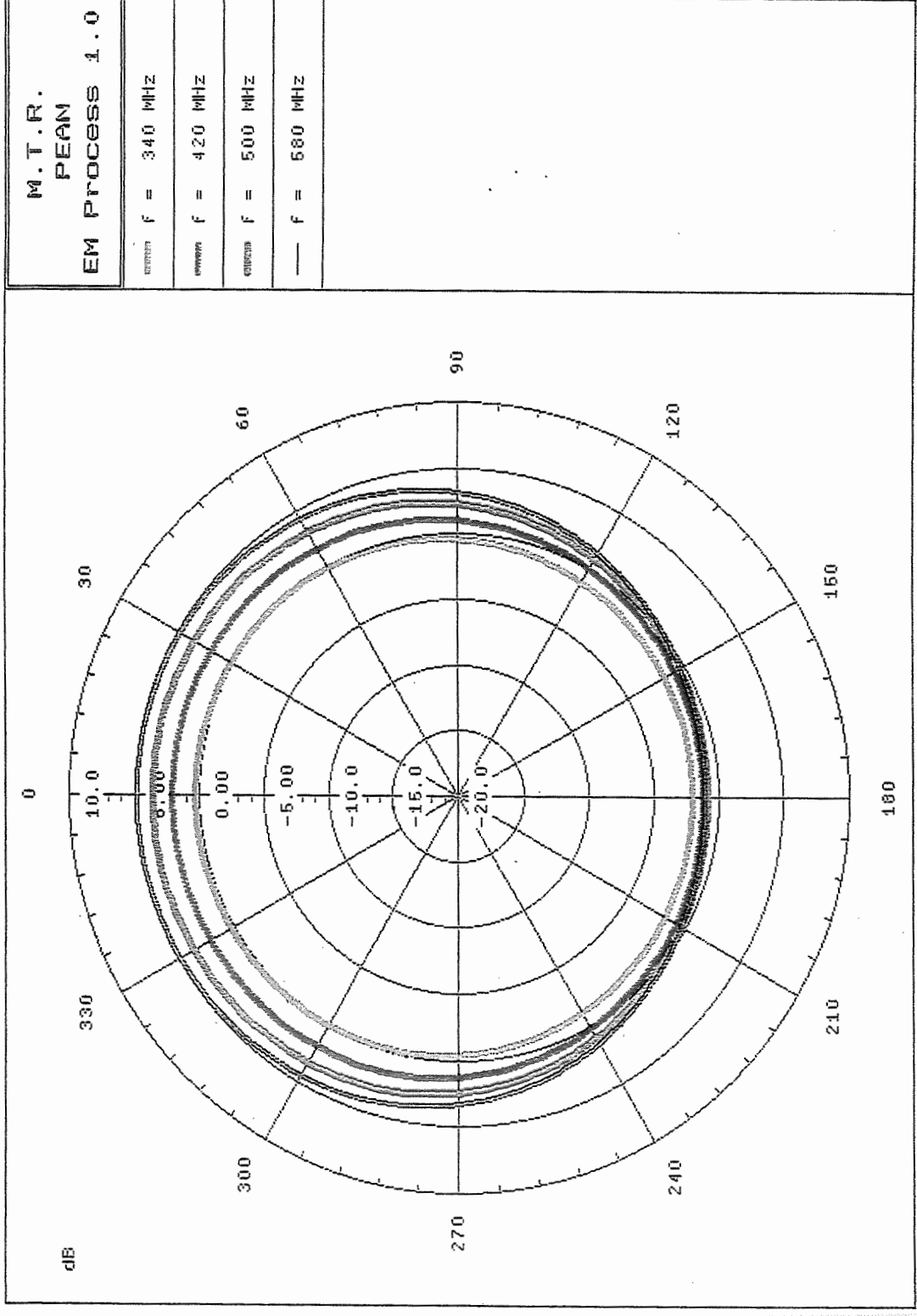
2-MAR-1993 14:23:23



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 20 CM

FIG. 9

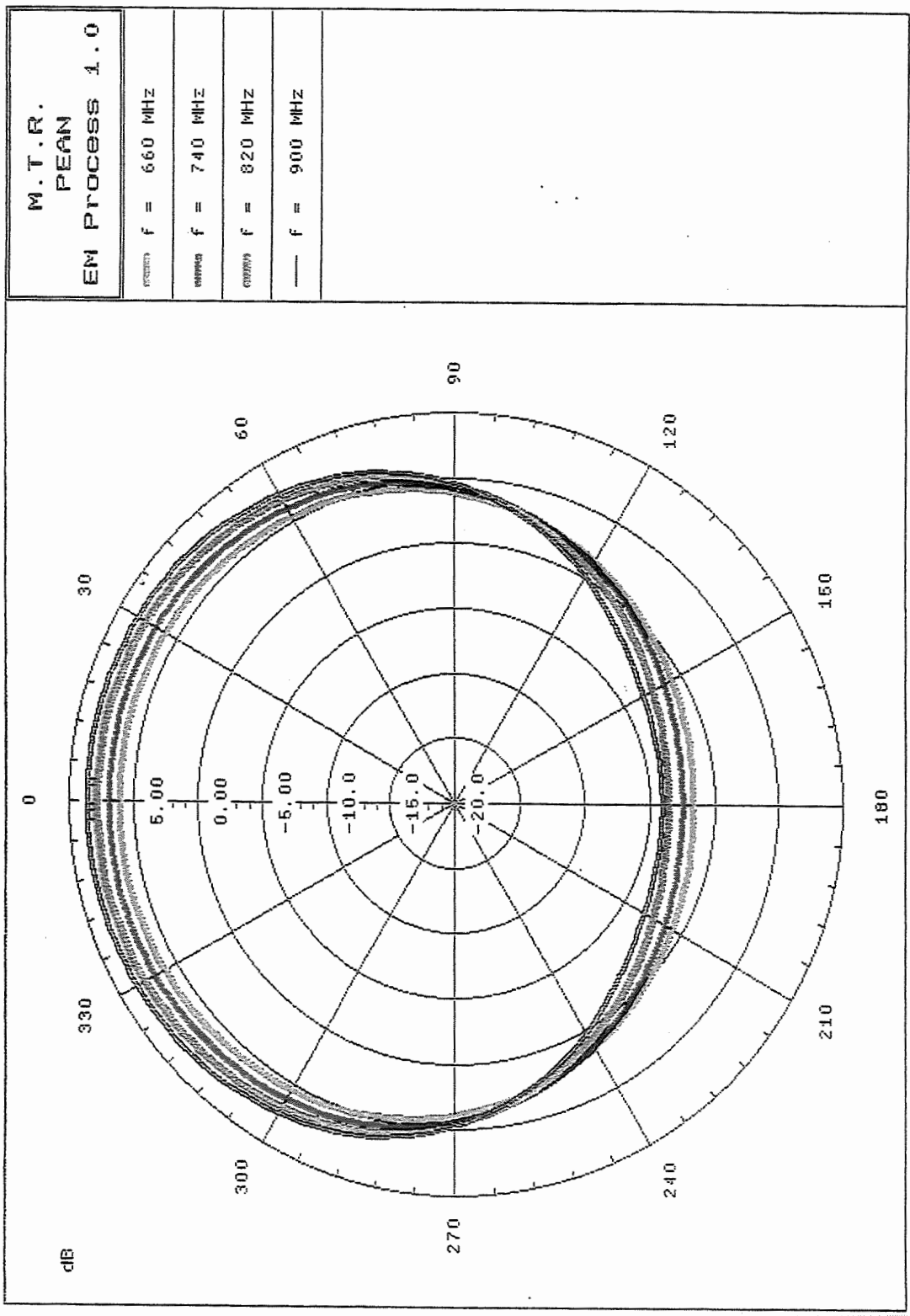
2-MAR-1993 14:26:51



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 20 CM

FIG. 10

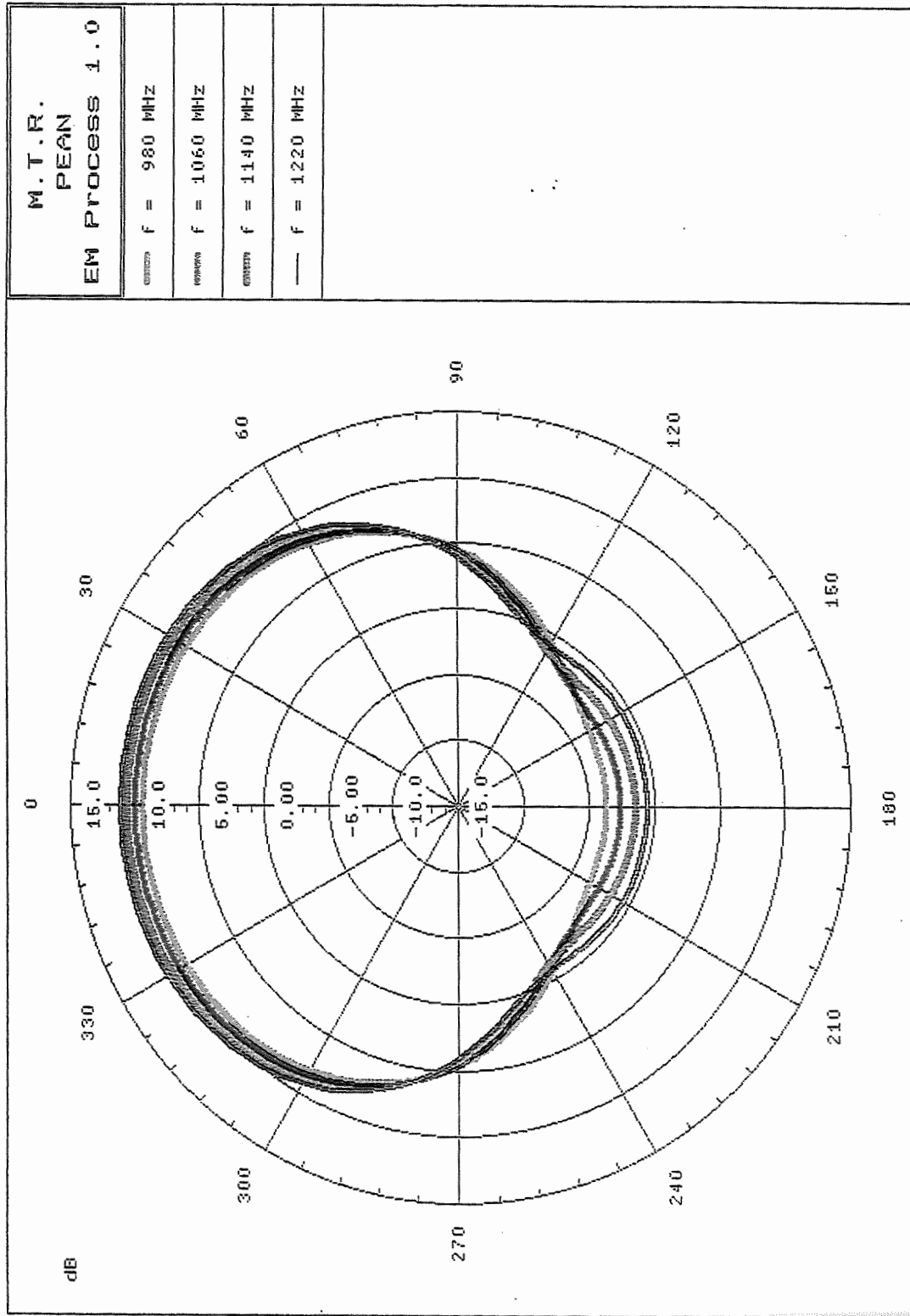
2-MAR-1993 14:33:59



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 20 CM

FIG. 11

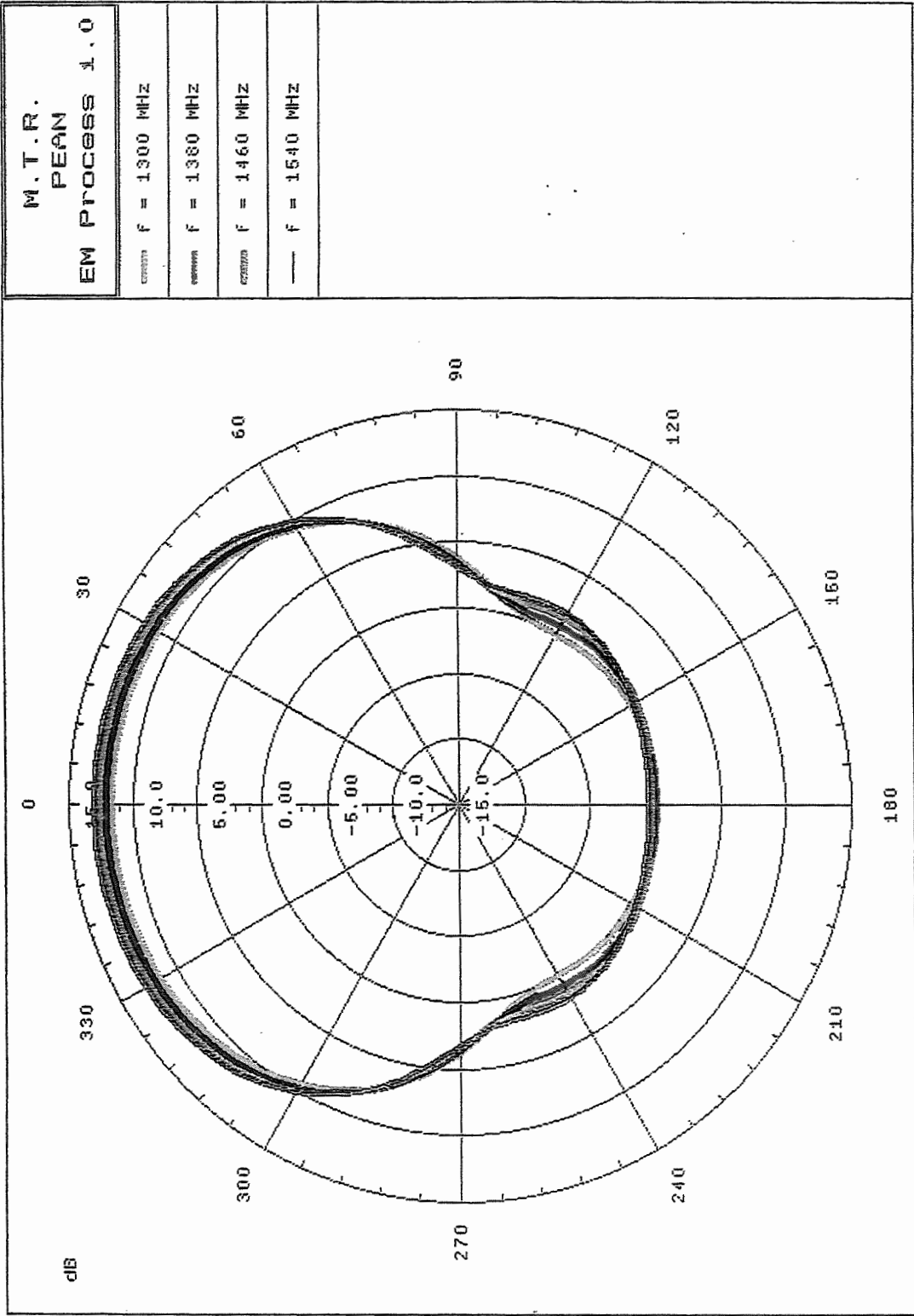
2-MAR-1993 14:39:32



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 20 CM

FIG. 12

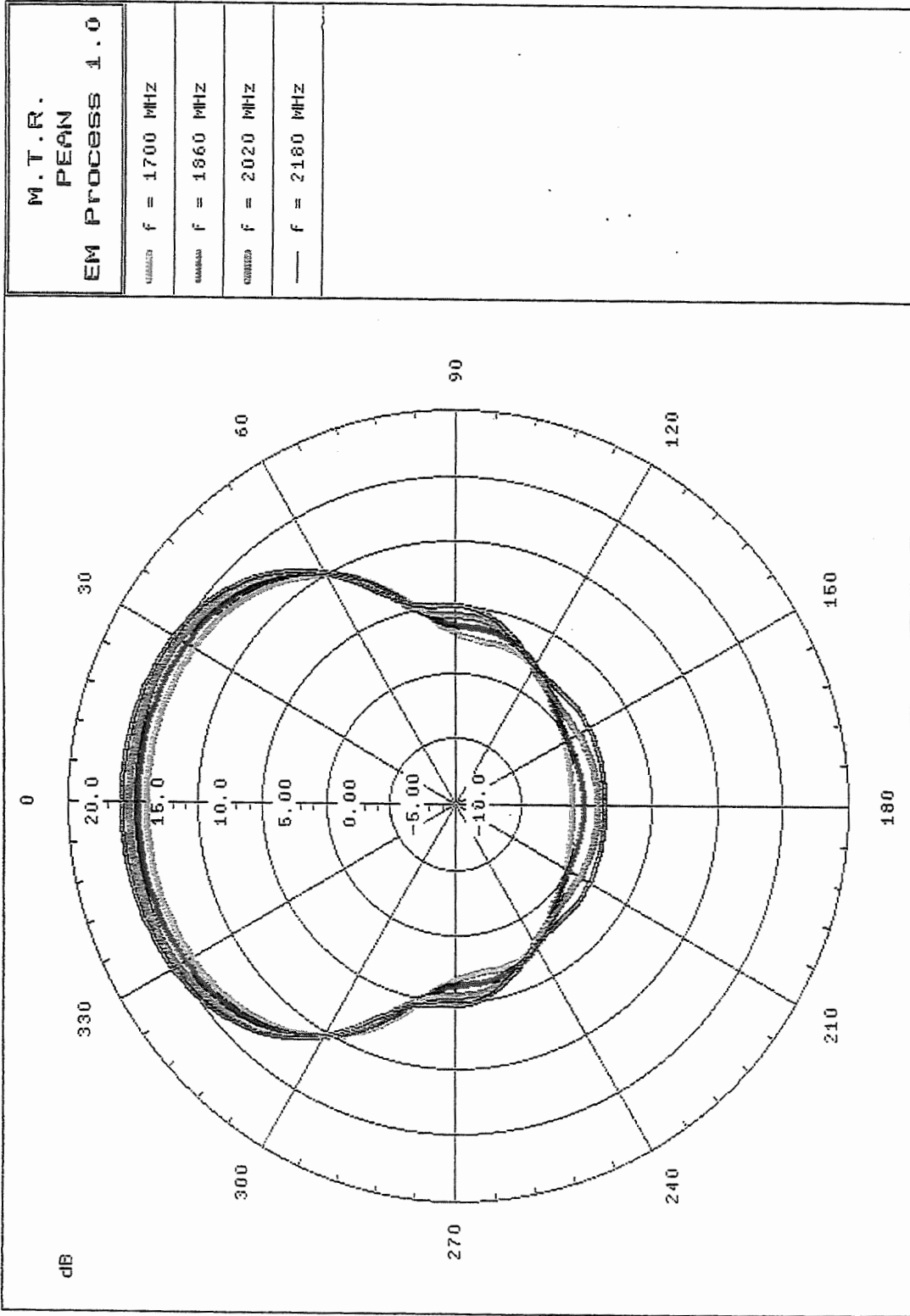
2-MAR-1993 14:45:36



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 20 CM

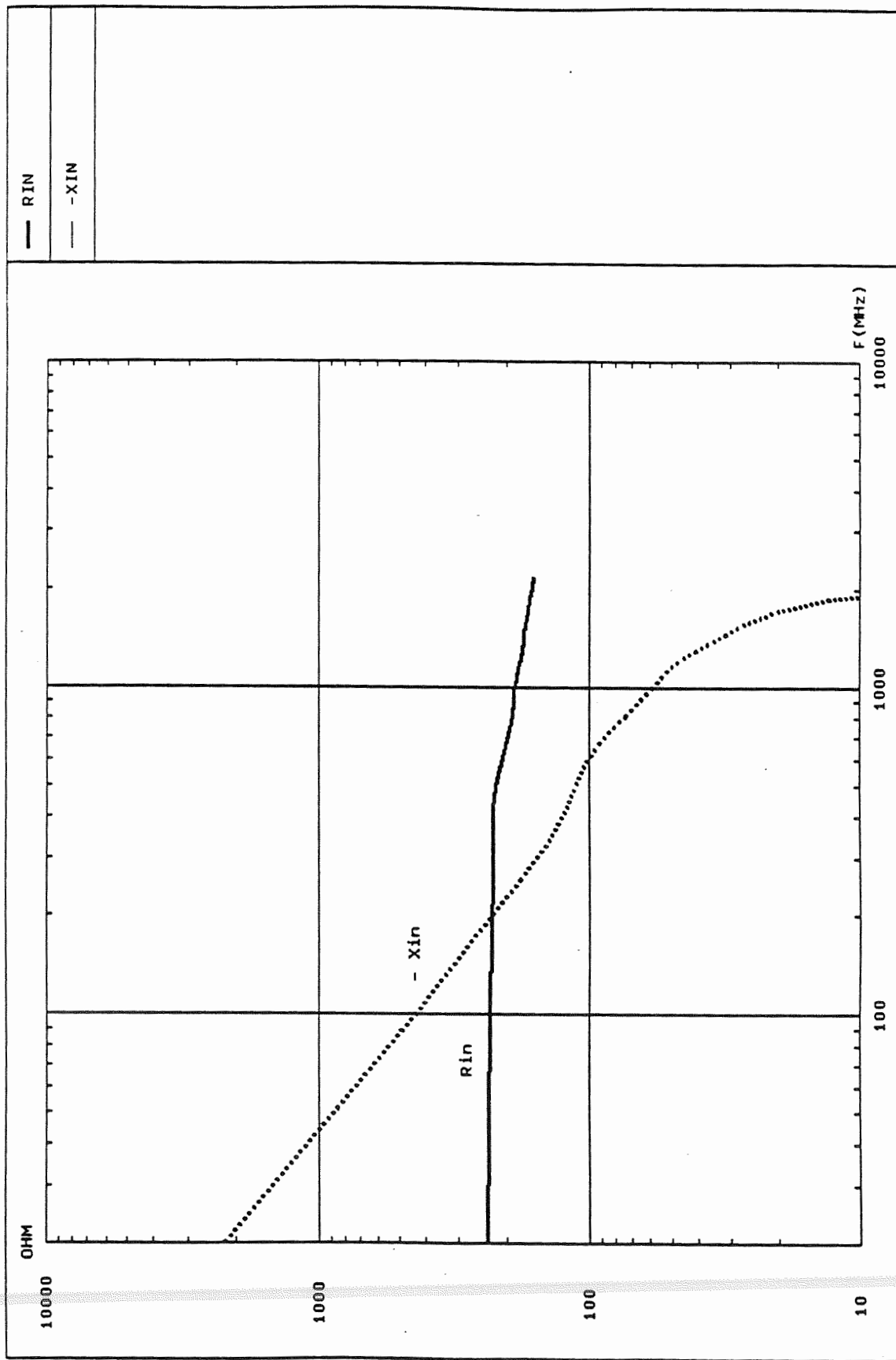
FIG. 13

2-MHF-1993 14:48:59



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 20 CM

FIG. 14



Resistenza e Reattanza di ingresso del monopolo lungo 30 cm

FIG. 15

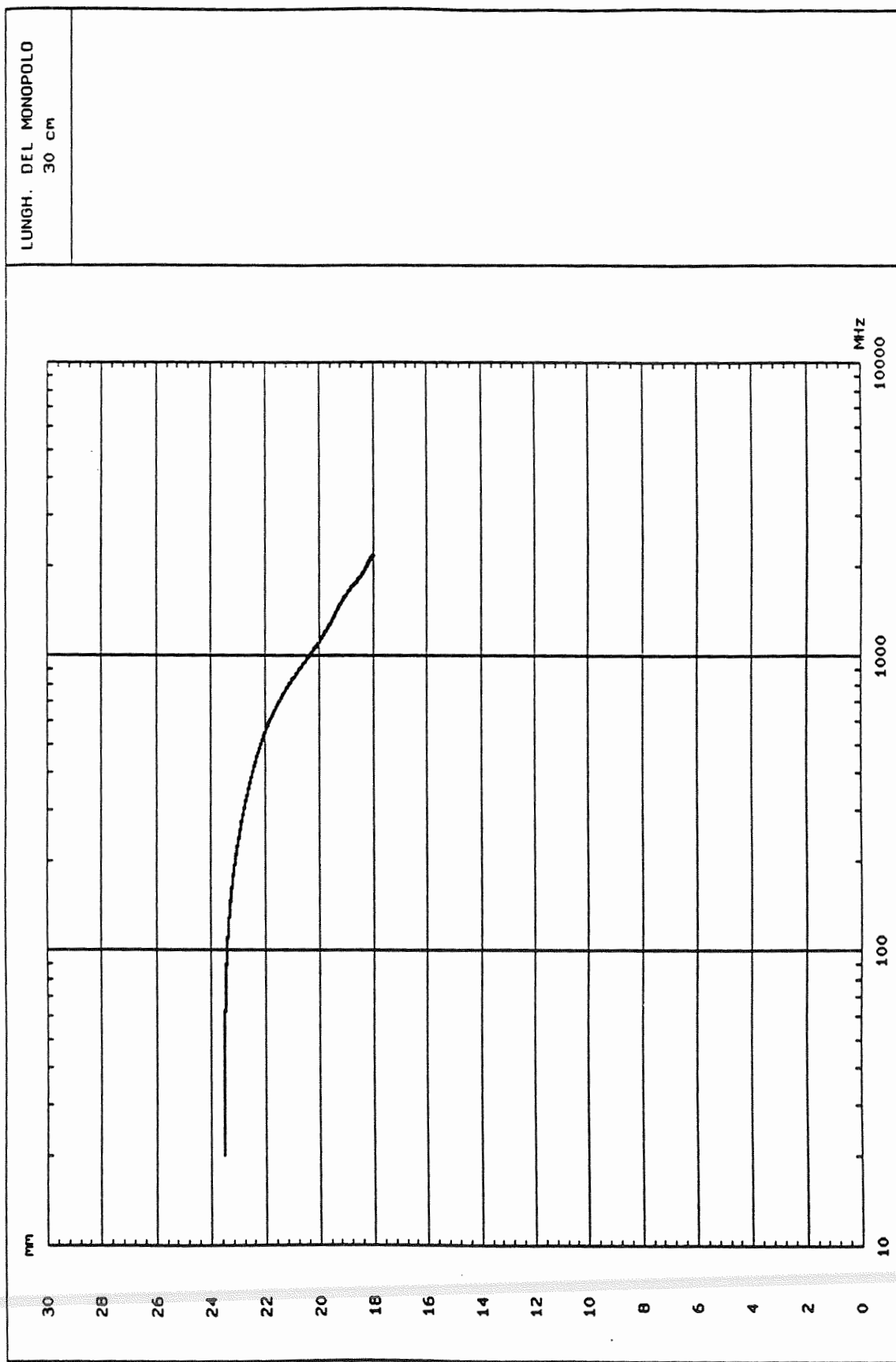


FIG. 16

Altezza efficace del monopolo a V in funzione della frequenza

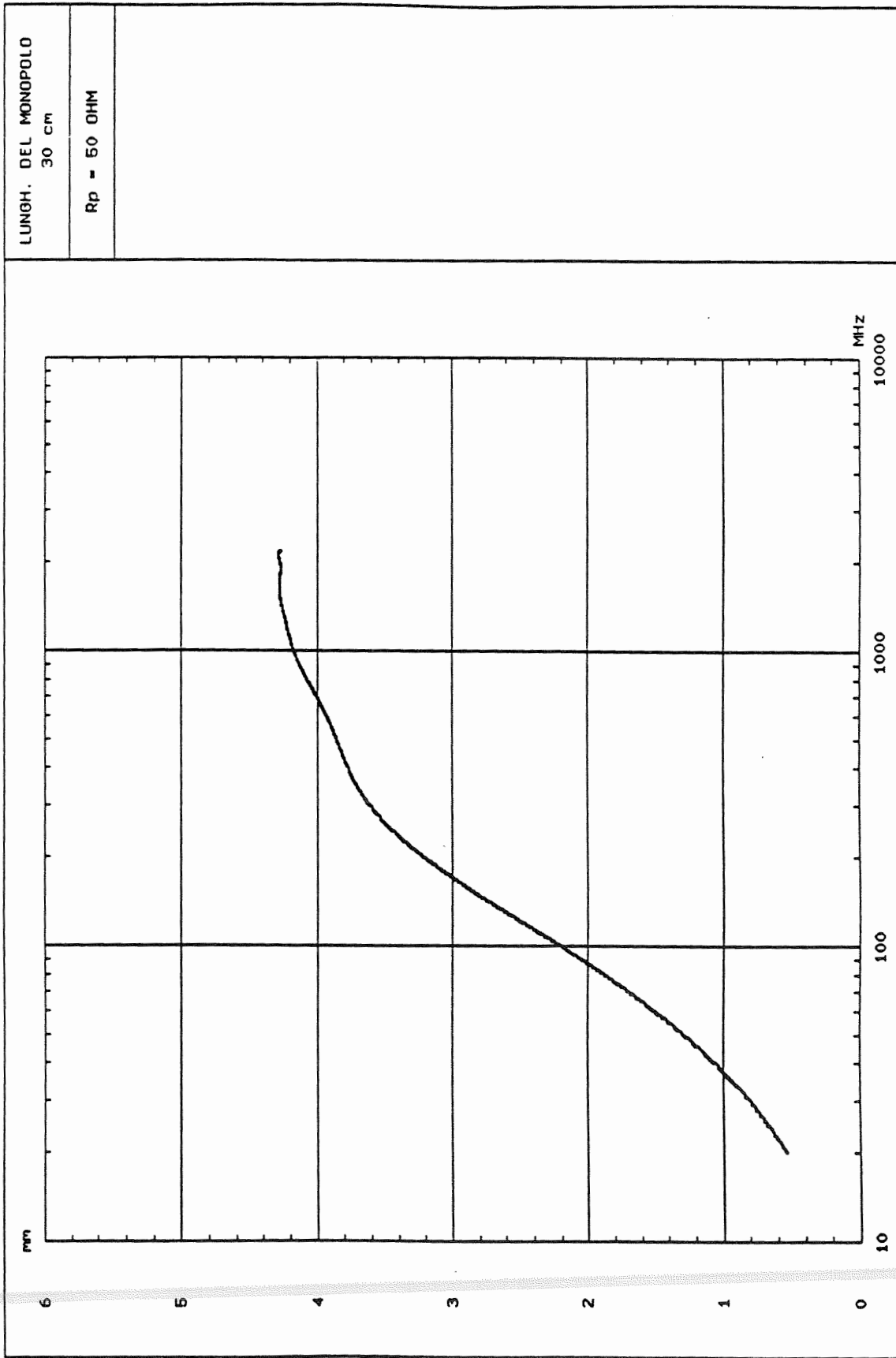


FIG. 17

Modulo della risposta in frequenza del monopolo a V

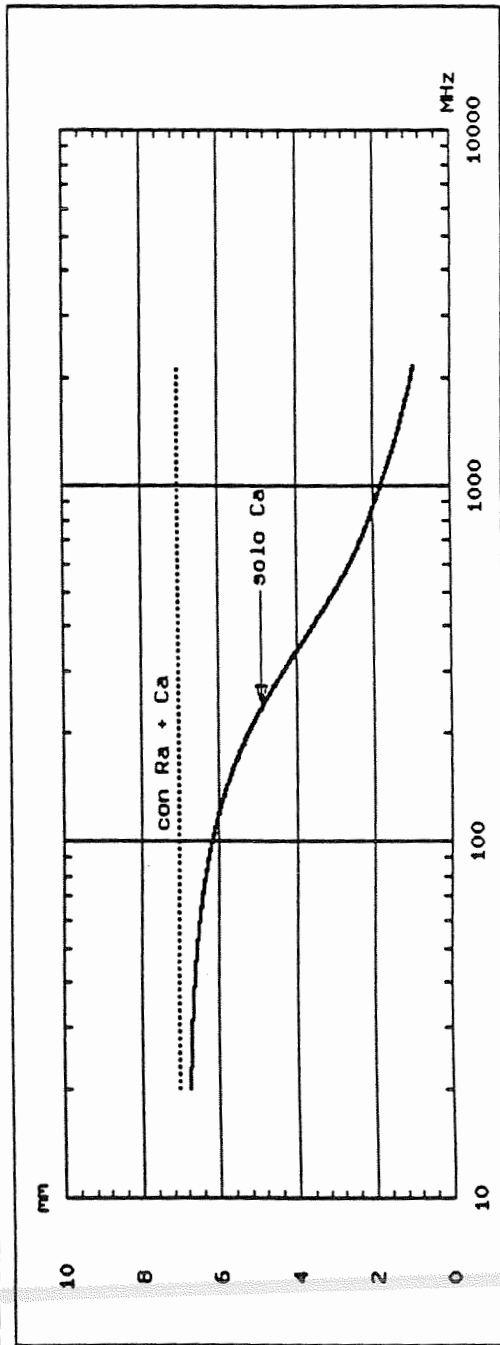
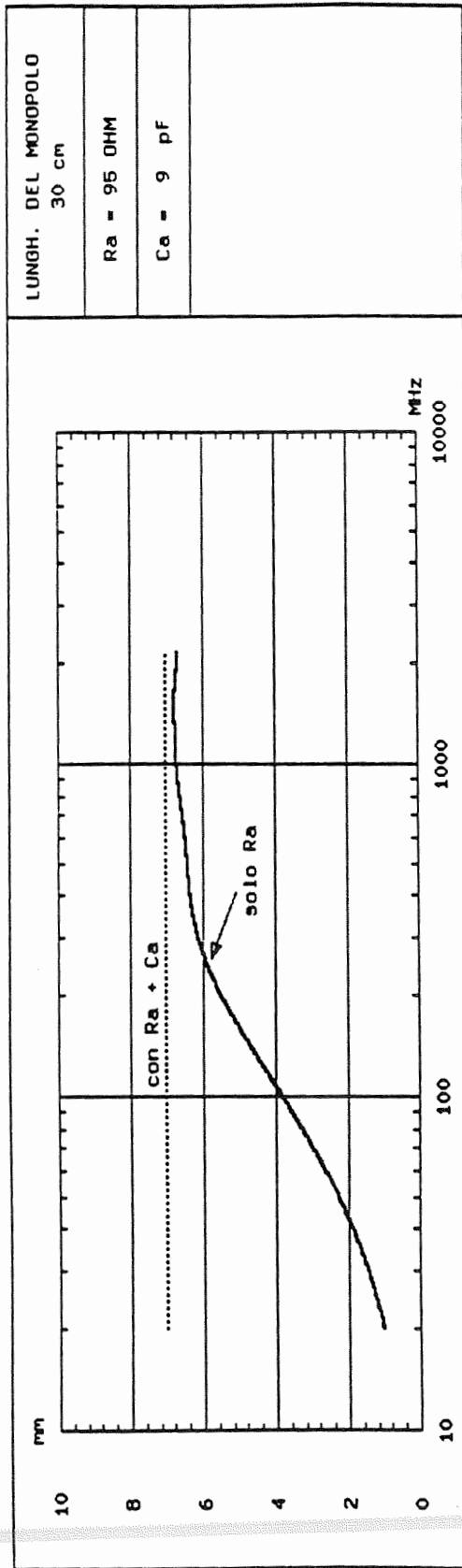


FIG. 18

Modulo della risposta in frequenza del monopolo a V

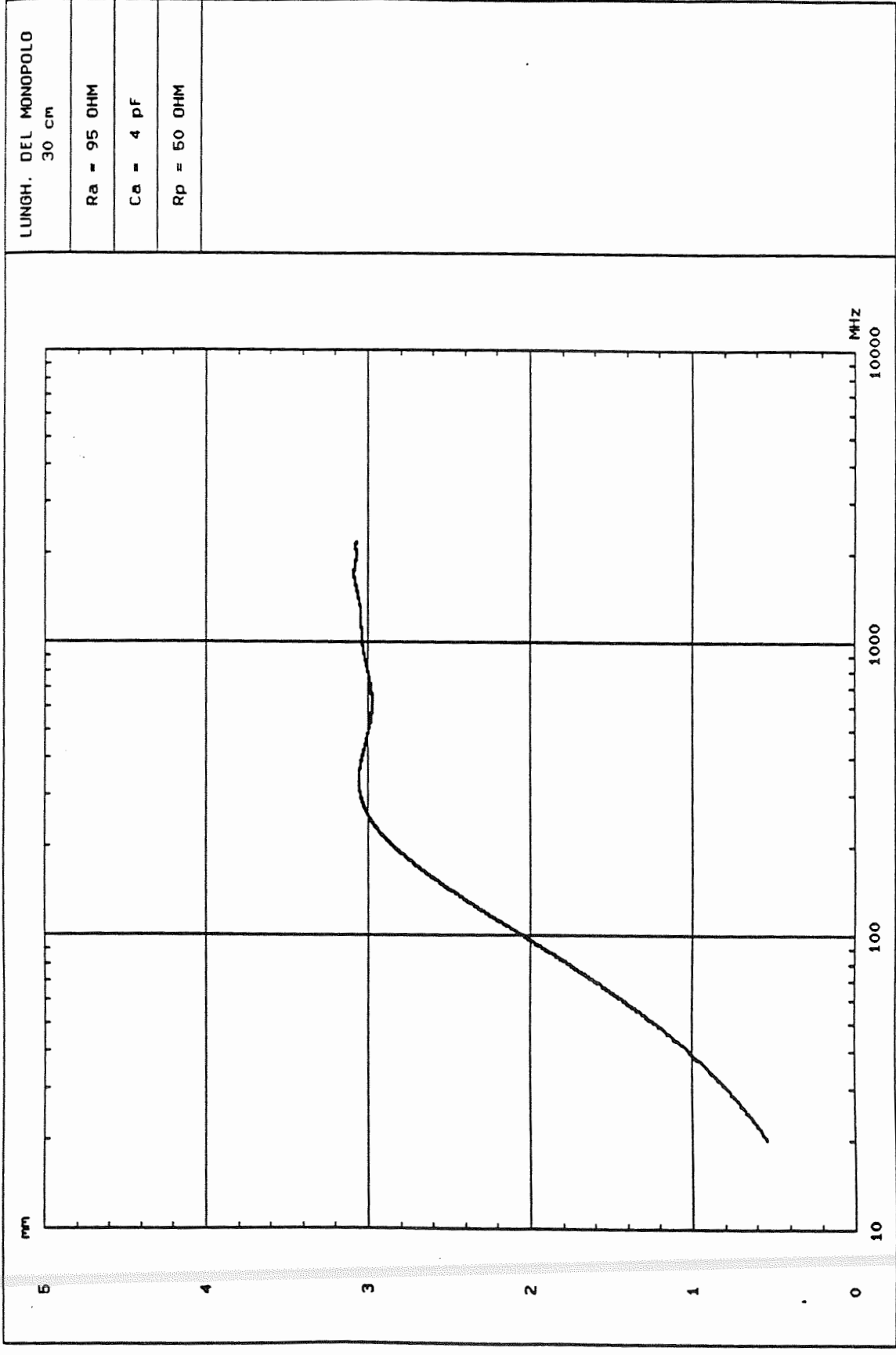
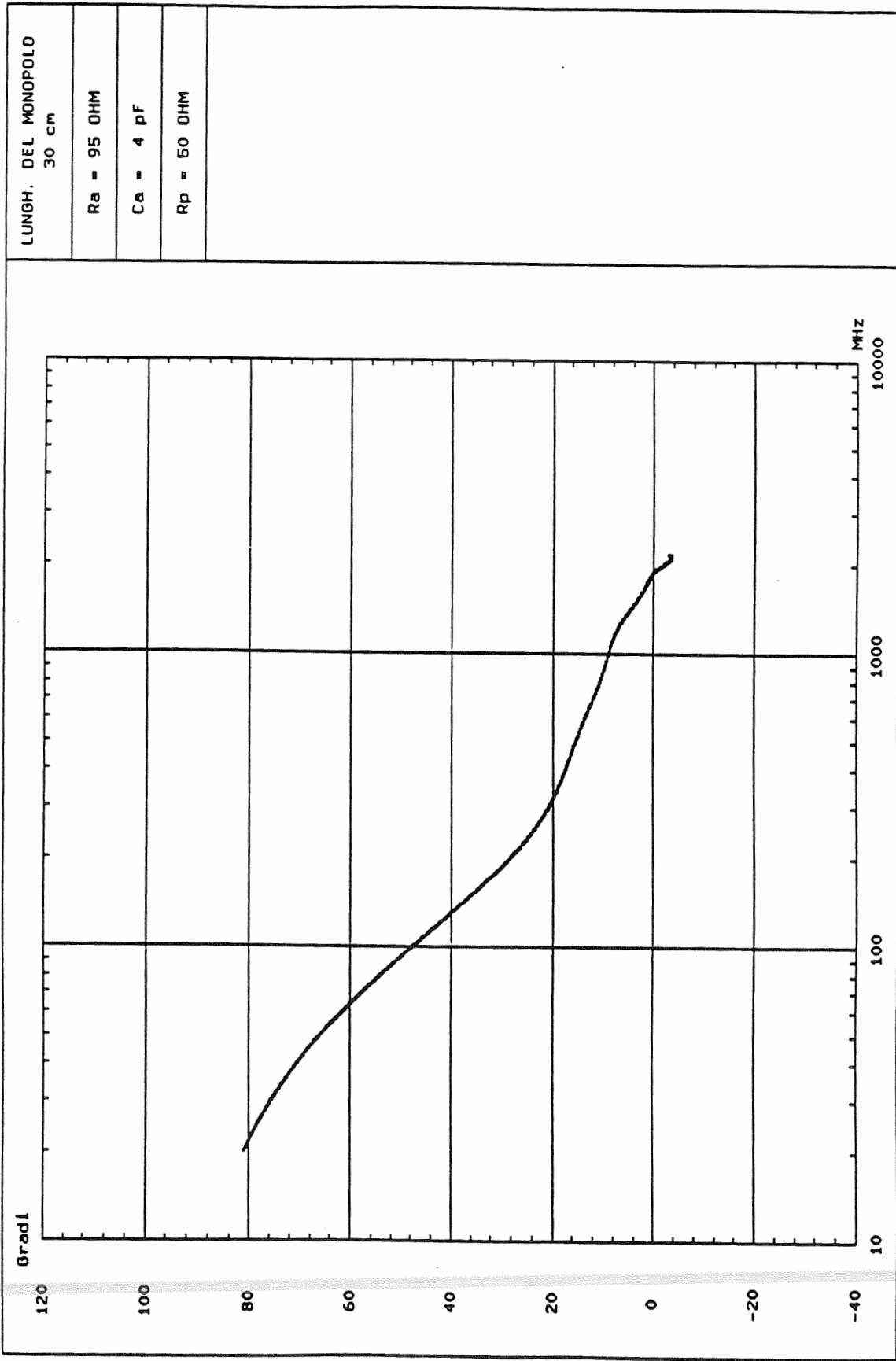


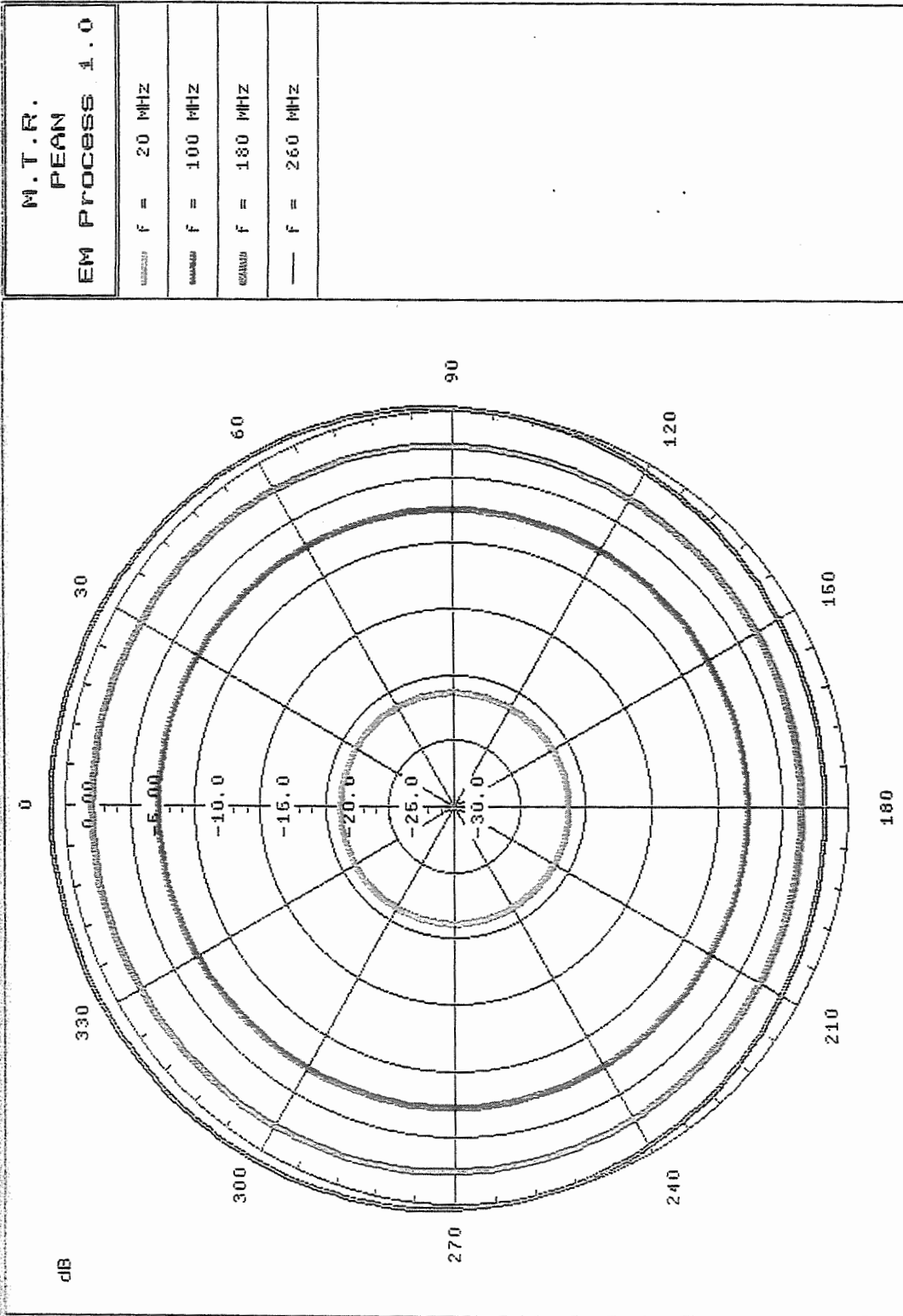
FIG. 19

Modulo della risposta in frequenza del monopolo a V



fase della risposta in frequenza del monopolo a v

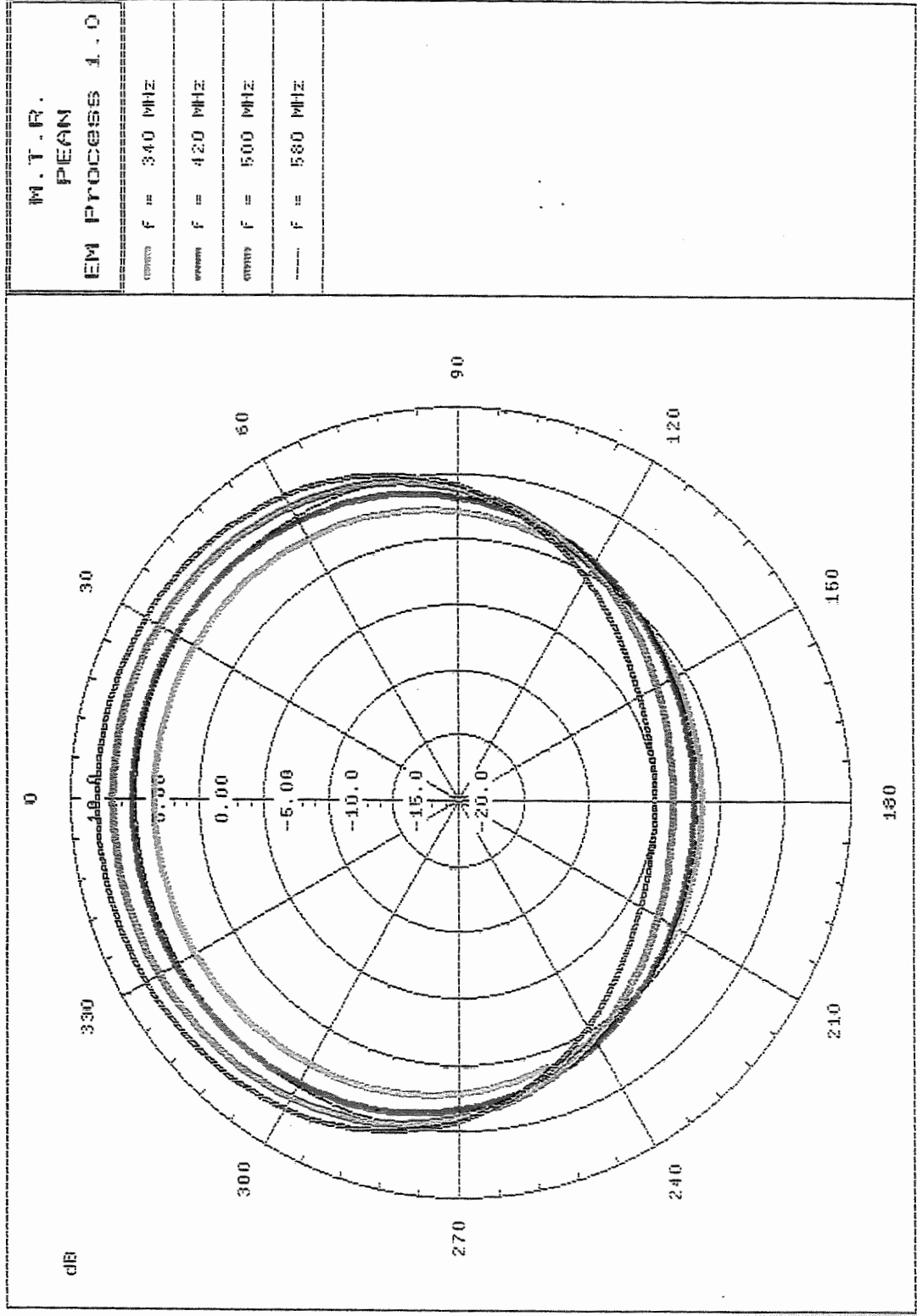
FIG. 20



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 30 CM

FIG. 21

3-MAR-1993 08:43:37



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 30 CM

FIG. 22

3-MAR-1993 08:46:56

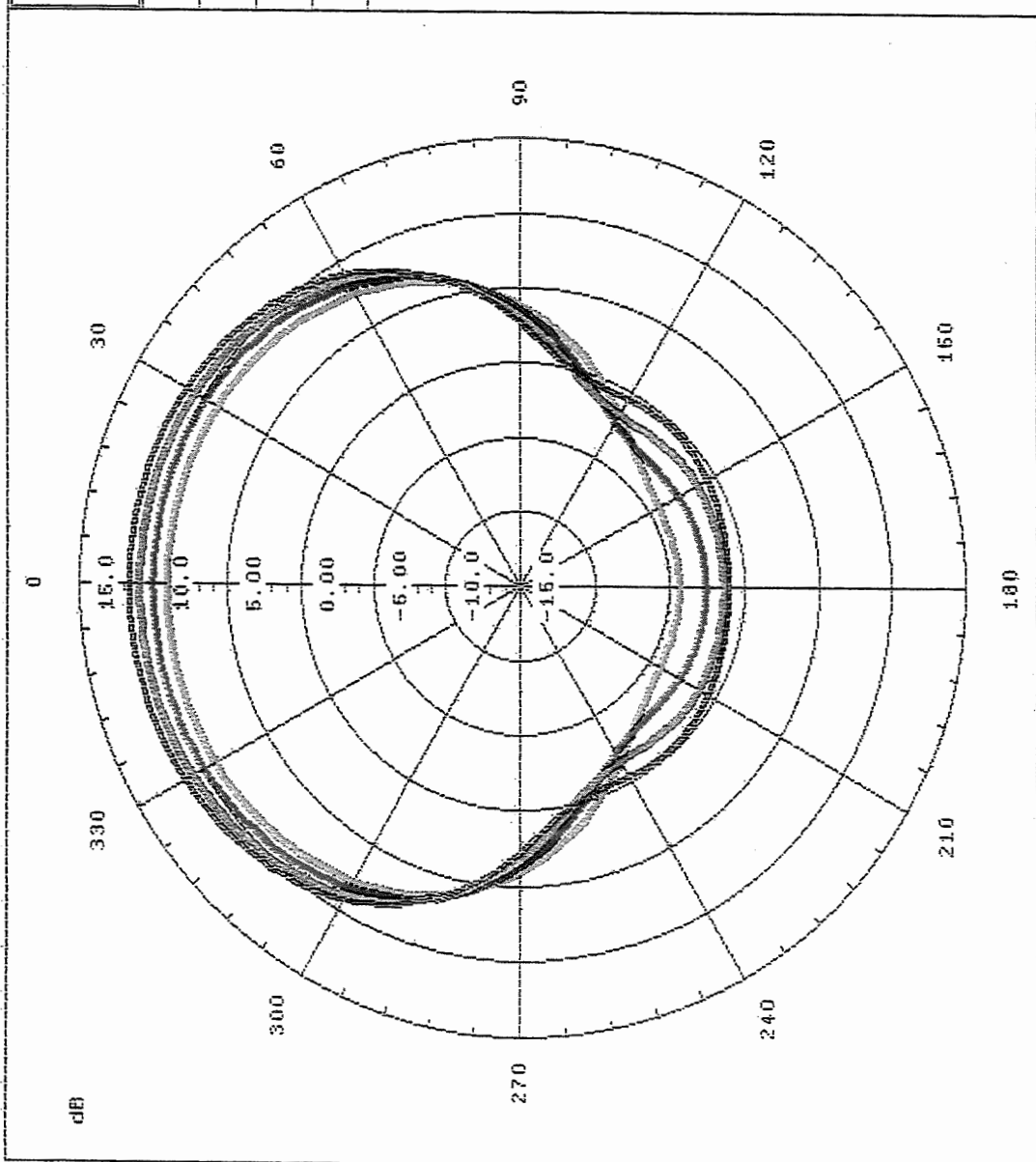
M.T.R.
PEAN
EM PROCESS 1.0

SOLID F = 660 MHz

DASHED F = 740 MHz

DOTTED F = 820 MHz

LONG DASH F = 900 MHz

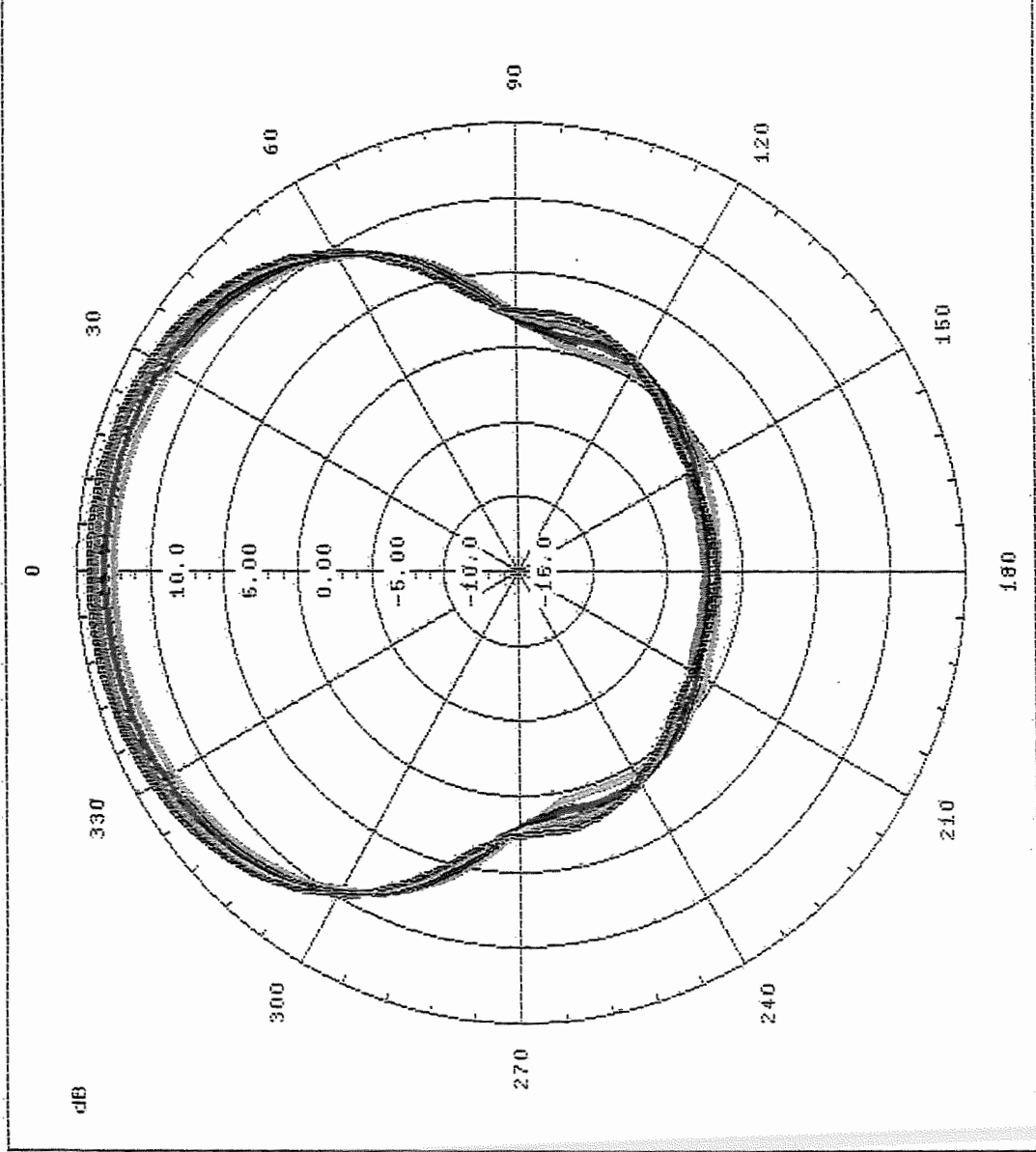


DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 30 CM

FIG. 23

3-MAR-1993 08:50:52

M.T.R.
PEAN
EM PROCESS 1.0
----- f = 980 MHz
----- f = 1060 MHz
----- f = 1140 MHz
----- f = 1220 MHz



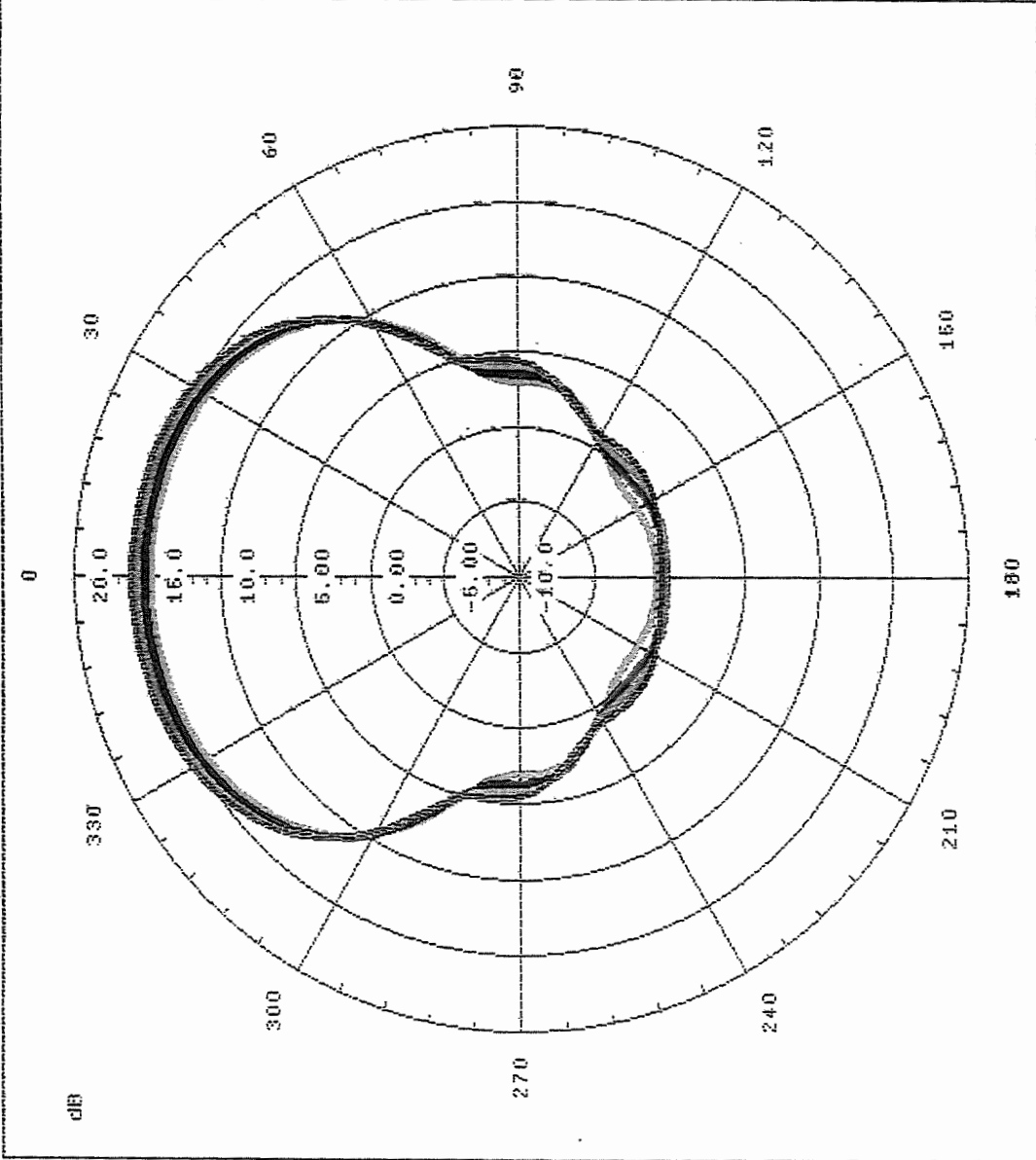
DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 30 CM

FIG. 24

3-MAR-1993 08:53:58

M.T.R.
PEAIN
EM PROCESS 1.0

-----	F = 1300 MHZ
-----	F = 1380 MHZ
-----	F = 1460 MHZ
-----	F = 1540 MHZ



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 30 CM

FIG. 25

3-MAR-1993 08:57:22

M.T.R.

PEAN

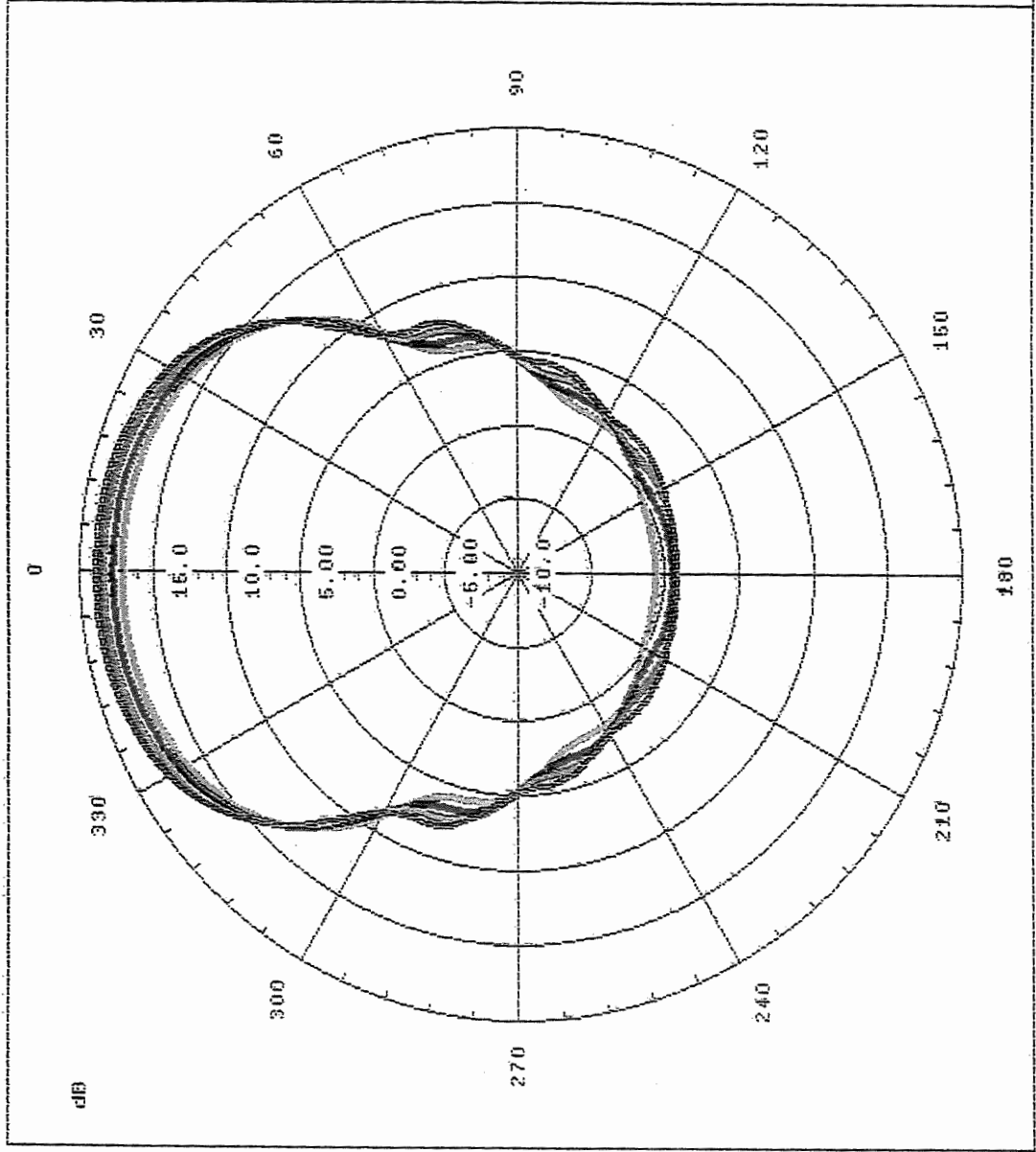
EM PROCESS 1.0

----- F = 1700 MHZ

----- F = 1860 MHZ

----- F = 2020 MHZ

----- F = 2180 MHZ



DIAGRAMMI DI IRRADIAZIONE SUL PIANO ORIZZONTALE
PER IL MONOPOLO LUNGO 30 CM

FIG. 26

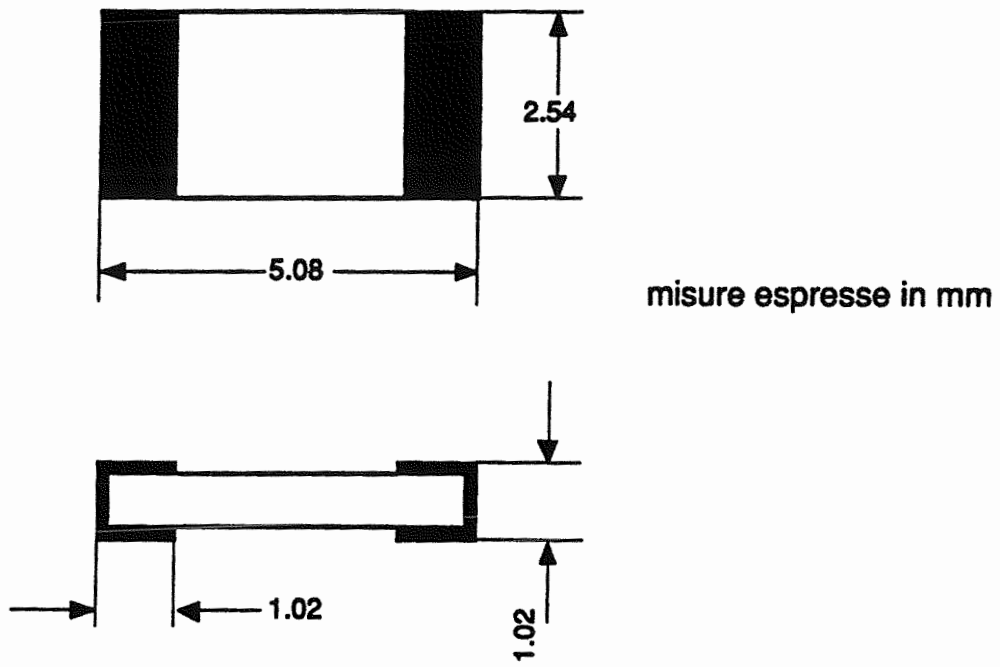


FIG. 27

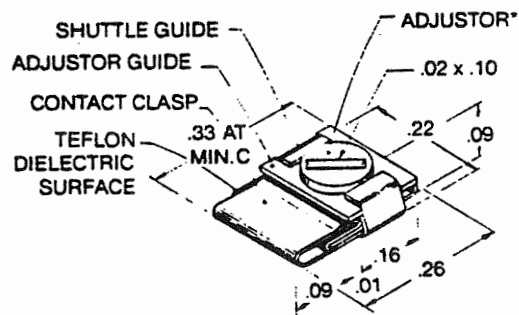


FIG. 28

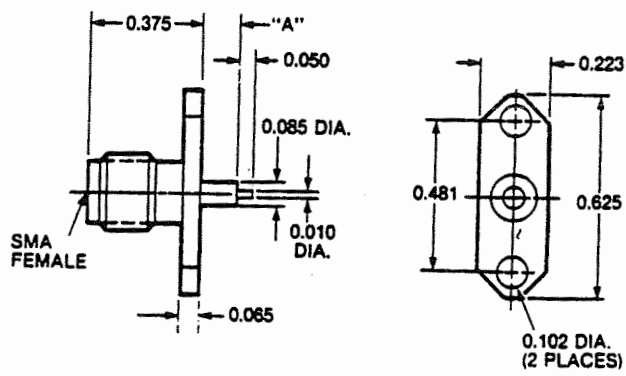
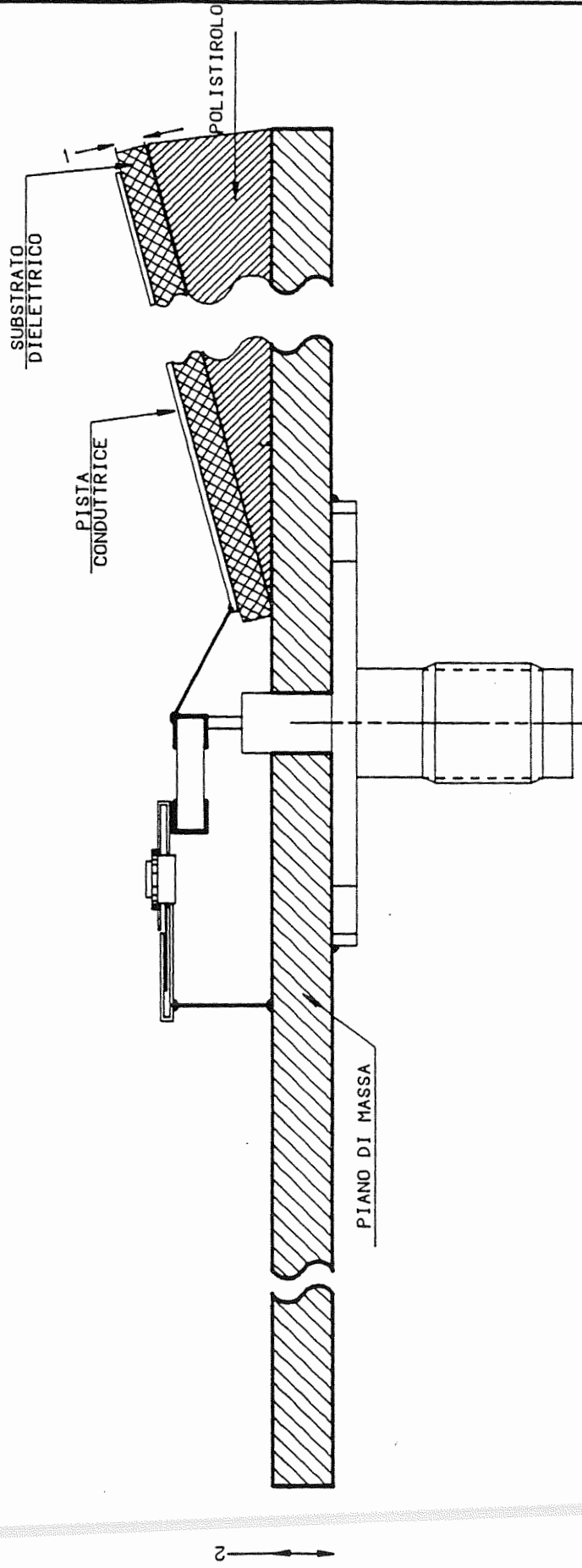


FIG. 29

VISTA LATERALE

Misure espresse in mm.

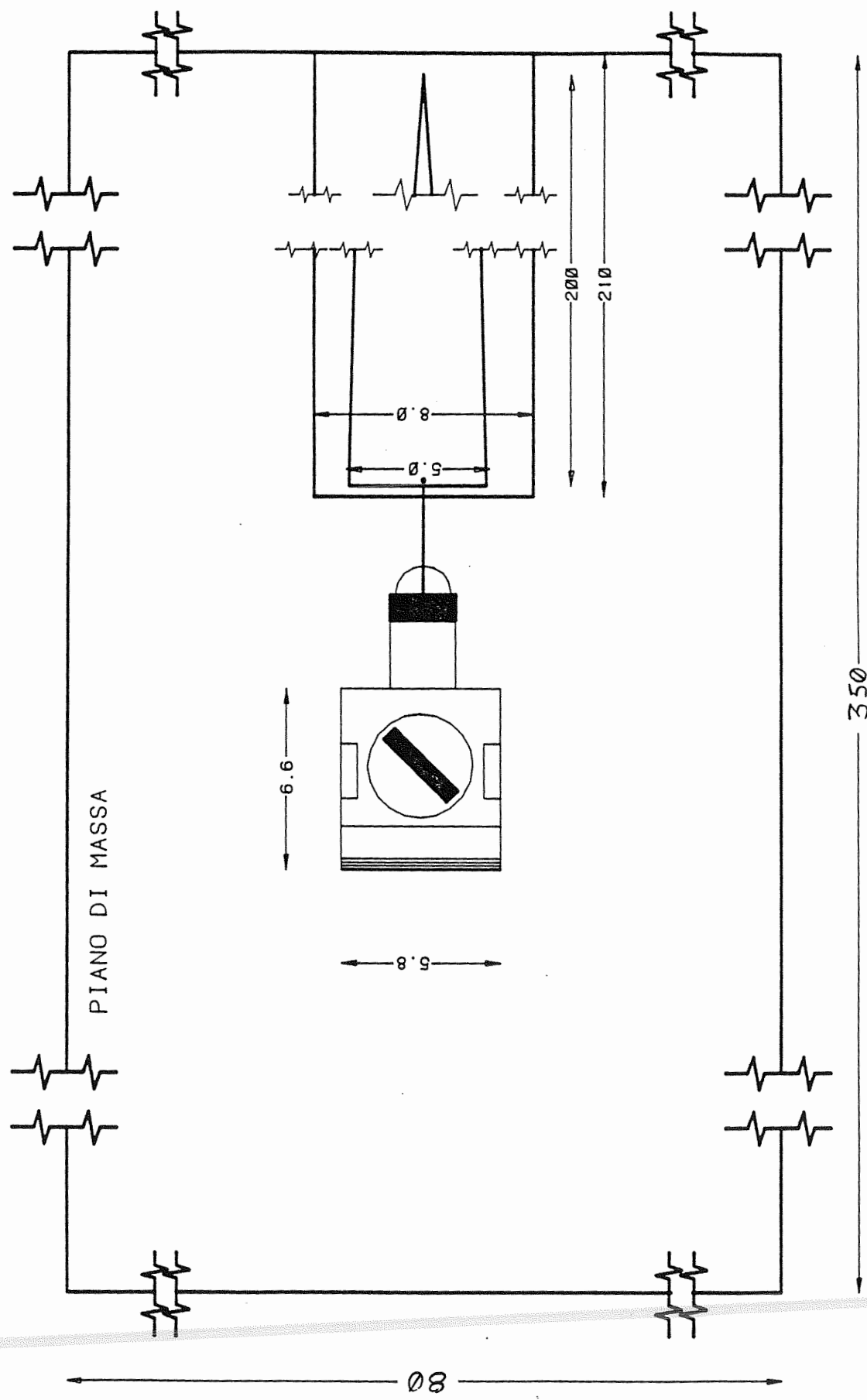


MONOPOLO A V CON RETE DI ADATTAMENTO

FIG. 30 a

VISTA DALL'ALTO

Misure espresse in mm.



PIANO DI MASSA

MONOPOLO A V CON RETE DI ADATTAMENTO

FIG. 30 b