

179700092



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

Associazione EURATOM-ENEA sulla Fusione

ISSN/M20-5563



IT9700092

IL RIFLETTOMETRO A MODULAZIONE DI AMPIEZZA PER FTU

MARCO ZERBINI, PAOLO BURATTI, CRISTINA CENTIOLI

ENEA- Dipartimento Energia
Centro Ricerche Frascati, Roma

PATRICIA AMADEO

ENEA Guest

VOL. 2, N. 2

RT/ERG/FUS/95/13

Testo pervenuto nel giugno 1995

Questo rapporto è stato preparato da: *Servizio Edizioni Scientifiche* - ENEA, Centro Ricerche Frascati, C.P. 65 - 00044 Frascati, Roma, Italia

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

SUMMARY

THE AMPLITUDE MODULATION REFLECTOMETER FOR FTU

Amplitude modulation (AM) reflectometry is a modification of the classical frequency sweep technique which allows to perform unambiguous phase delay measurements. An eight-channel AM reflectometer has been realized for the measurement of density profiles on the FTU tokamak in the $(0.34 - 1) \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ range. The characteristics of the instrument have been determined in extensive laboratory tests; particular attention has been devoted to the effect of interference with parasitic reflections.

The reflectometer is now operating on FTU. Some examples of the first experimental data are discussed.

(MICROWAVE REFLECTOMETRY, PHASE, AMPLITUDE MODULATION, PLASMA DENSITY)

RIASSUNTO

La riflettometria a modulazione di ampiezza (AM) è una modifica della tecnica classica a frequenza variabile che permette la misura univoca del ritardo di fase per la determinazione del profilo di densità del plasma e per lo studio delle fluttuazioni di densità. È stato realizzato un riflettometro AM ad otto canali per misure di densità nell'intervallo $(0.34 - 1) \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$. Le caratteristiche dello strumento sono state accuratamente verificate con numerose prove di laboratorio; il problema delle riflessioni spurie è stato studiato con attenzione.

Il riflettometro è ora operante su FTU. Viene presentato e discusso un primo insieme di dati sperimentali relativi a misure su plasma.

INDICE

1. I PRINCIPI DELLA RIFLETTOMETRIA.	p.	7
2. LA DIAGNOSTICA DI RIFLETTOMETRIA AM PER FTU.	p.	11
3. PROVE DI LABORATORIO.	p.	15
4. ACQUISIZIONE E CONTROLLO.	p.	19
5. PRIMI RISULTATI SPERIMENTALI.	p.	22
6. DISCUSSIONE E PROGRAMMI FUTURI.	p.	31
RINGRAZIAMENTI.	p.	31
BIBLIOGRAFIA.	p.	32

IL RIFLETTOMETRO A MODULAZIONE DI AMPIEZZA PER FTU

1 - I PRINCIPI DELLA RIFLETTOMETRIA

La riflessione di un'onda elettromagnetica di frequenza ω viaggiante all'interno di un plasma, si verifica quando l'indice di rifrazione dell'onda si annulla; la frazione di onda che si propaga oltre tale punto detto di "cutoff" è fortemente smorzata e quindi, per conservazione dell'energia, deve verificarsi una riflessione.

In un metallo [1], data l'altissima densità del plasma di elettroni e l'elevato gradiente al suo interno, la riflessione è localizzata in uno strato vicinissimo alla superficie per radiazione incidente di frequenza fino al visibile ed oltre; in un plasma di tipo diverso, quale quello di un tokamak od altro dispositivo di confinamento magnetico, la regione di riflessione può cambiare in modo significativo con la frequenza incidente. In particolare, nel caso di onde perpendicolari, ovvero con vettore di propagazione ortogonale al campo magnetico esterno, si individuano i seguenti due casi rilevanti per le applicazioni [2]:

1. Propagazione nel modo ordinario, ovvero con polarizzazione parallela al campo magnetico per la quale l'indice di rifrazione si scrive:

$$N^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad \text{con} \quad \omega_p^2 = \frac{nq^2}{m\epsilon_0} \quad (1.1)$$

dove n , q , ed m sono rispettivamente la densità, la carica e la massa degli elettroni ed ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto. Il cutoff ($N=0$) si presenta quindi per valori di densità per i quali la frequenza di plasma corrisponde a quella dell'onda incidente: $\omega = \omega_p$.

2. Propagazione nel modo straordinario, ovvero con la polarizzazione perpendicolare al campo magnetico, per la quale l'indice di rifrazione vale:

$$N^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \cdot \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 - \Omega_c^2 - \omega_p^2} \quad \text{con} \quad \Omega_c = \frac{qB}{m} \quad (1.2)$$

dove Ω_c é la frequenza di ciclotrone degli elettroni di immersi in un campo magnetico B.

La riflessione avviene a due frequenze, dette upper e lower cutoff:

$$\omega_L = \left(\omega_p^2 + \frac{1}{4} \Omega_c^2 \right)^{1/2} - \frac{1}{2} \Omega_c \quad (1.3)$$

$$\omega_U = \left(\omega_p^2 + \frac{1}{4} \Omega_c^2 \right)^{1/2} + \frac{1}{2} \Omega_c \quad (1.4)$$

In assenza di campo magnetico, $\Omega_c=0$ e si ritrova il cutoff ordinario.

In entrambi i casi lo sfasamento totale accumulato da un'onda riflessa rispetto all'onda incidente di riferimento, valutato con calcoli full-wave [3] é dato, utilizzando i simboli definiti in fig. 1, da:

$$\phi = 2 \frac{\omega}{c} \int_{r_{cr}}^{r_0+a} N(r) dr - \frac{\pi}{2} = \frac{2}{c} \int_{r_{cr}}^{r_0+a} \sqrt{\omega^2 - \omega_p^2} dr - \frac{\pi}{2} \quad (1.5)$$

dove la seconda uguaglianza vale solo per il modo ordinario, che é stato utilizzato in questa prima fase di misure riflettometriche ad FTU ed al quale si farà sempre riferimento nel seguito.

Misurando la fase ϕ per una data frequenza incidente ω , la formula (1.5) consente di ottenere informazioni sulla posizione dello strato riflettente corrispondente al cutoff ω_p . In particolare, effettuando la misura di fase per molti valori della frequenza incidente, l'inversione di Abel [4,5] permette di ricavare la posizione r_{cr} dello strato:

$$r_{cr} = r_{ant} - \frac{c}{\pi} \int_0^{\omega_p} \frac{1}{\sqrt{\omega^2 - \omega_p^2}} \frac{d\phi}{d\omega} d\omega \quad (1.6)$$

Assumendo invece un profilo di densità medio, noto e costante entro un certo errore, si possono determinare le fluttuazioni della posizione dello strato riflettente (Δr) corrispondente ad una certa frequenza incidente, stavolta fissa, dalla relazione[4]:

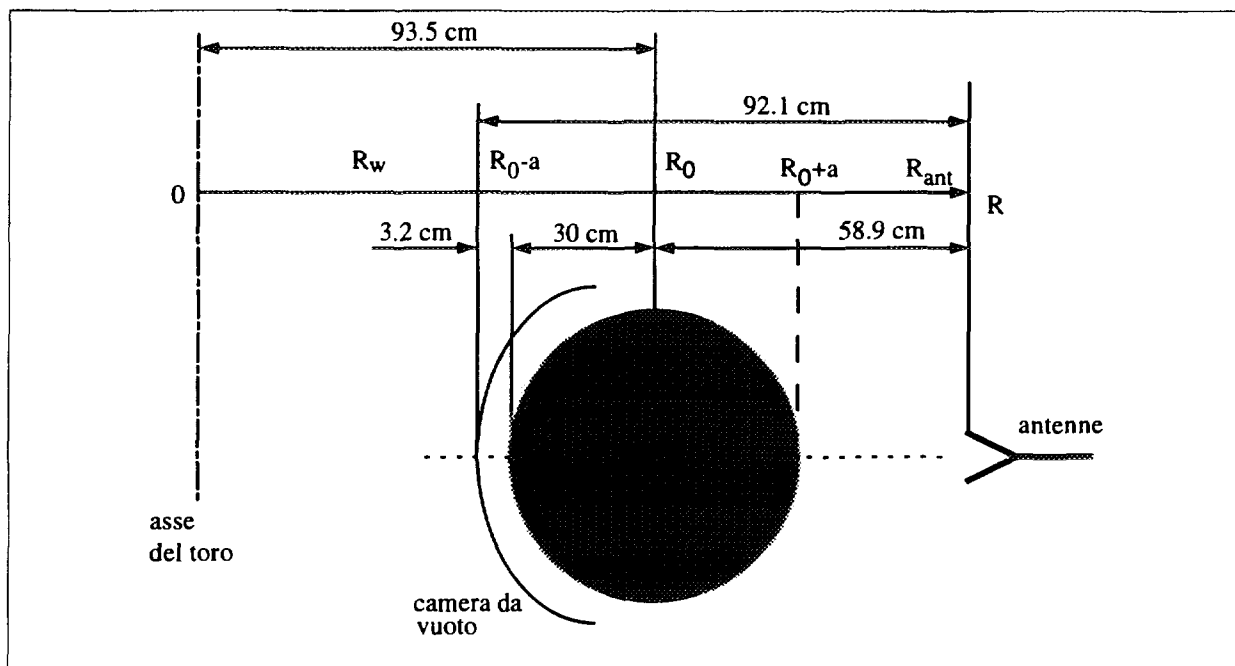


Fig. 1- Distanze di rilievo per i riflettometri di FTU; i valori numerici si riferiscono alla campagna sperimentale del 1994 (la scala del grafico è approssimata).

$$\Delta\phi = \frac{2\omega}{c} \bar{N} \Delta r \quad (1.7)$$

dove si assume che l'indice di rifrazione si discosti poco dal suo valor medio (\bar{N}) intorno allo strato riflettente.

Per i plasmi utilizzati nelle macchine quale FTU, la frequenza di plasma è dell'ordine dei 100 GHz, le lunghezze d'onda risultano quindi di qualche millimetro e gli sfasamenti misurati su distanze dell'ordine del metro sono multipli di 2π . Questo impone l'uso di un fitto campionamento della fase e la necessità di un tracciamento continuo della stessa, in quanto una perdita di frangia renderebbe impossibile la misura del valore assoluto della fase stessa. Nella tecnica della modulazione in ampiezza [6] si modula l'onda incidente, detta portante, con un'onda a frequenza più bassa; in questo modo le proprietà di riflessione sono determinate dalla frequenza della portante, ma lo sfasamento può essere misurato sulla modulante e, scegliendone opportunamente la lunghezza d'onda in modo che sia dell'ordine dei cammini percorsi, questo risulta sempre minore di 2π . Si dimostra facilmente che il ritardo di fase Φ_{AM} , di un'onda a frequenza Ω è legato a quello della portante dalla relazione [7]:

$$\Phi_{AM} = \left. \frac{d\phi}{d\omega} \right|_{\omega_0} \cdot \Omega \quad (1.8)$$

Rispetto alla riflettometria classica, la tecnica AM permette quindi di ottenere una misura di fase univoca (a singola frangia) e la perdita del segnale per un breve intervallo di tempo, dovuta a problemi di rumore oppure all'uso di una variazione a valori discreti della frequenza incidente, non determina la perdita dell'informazione come nel caso della misura a molte frange. Per distanze dell'ordine del metro, si utilizzano frequenze AM di circa 200 MHz. Questo semplifica la parte elettronica di misura di fase e consente di mediare gli effetti di turbolenza del plasma nella misura di profili. Risulta però ridotta la risoluzione della misura, soprattutto importante per piccoli spostamenti dello strato riflettente.

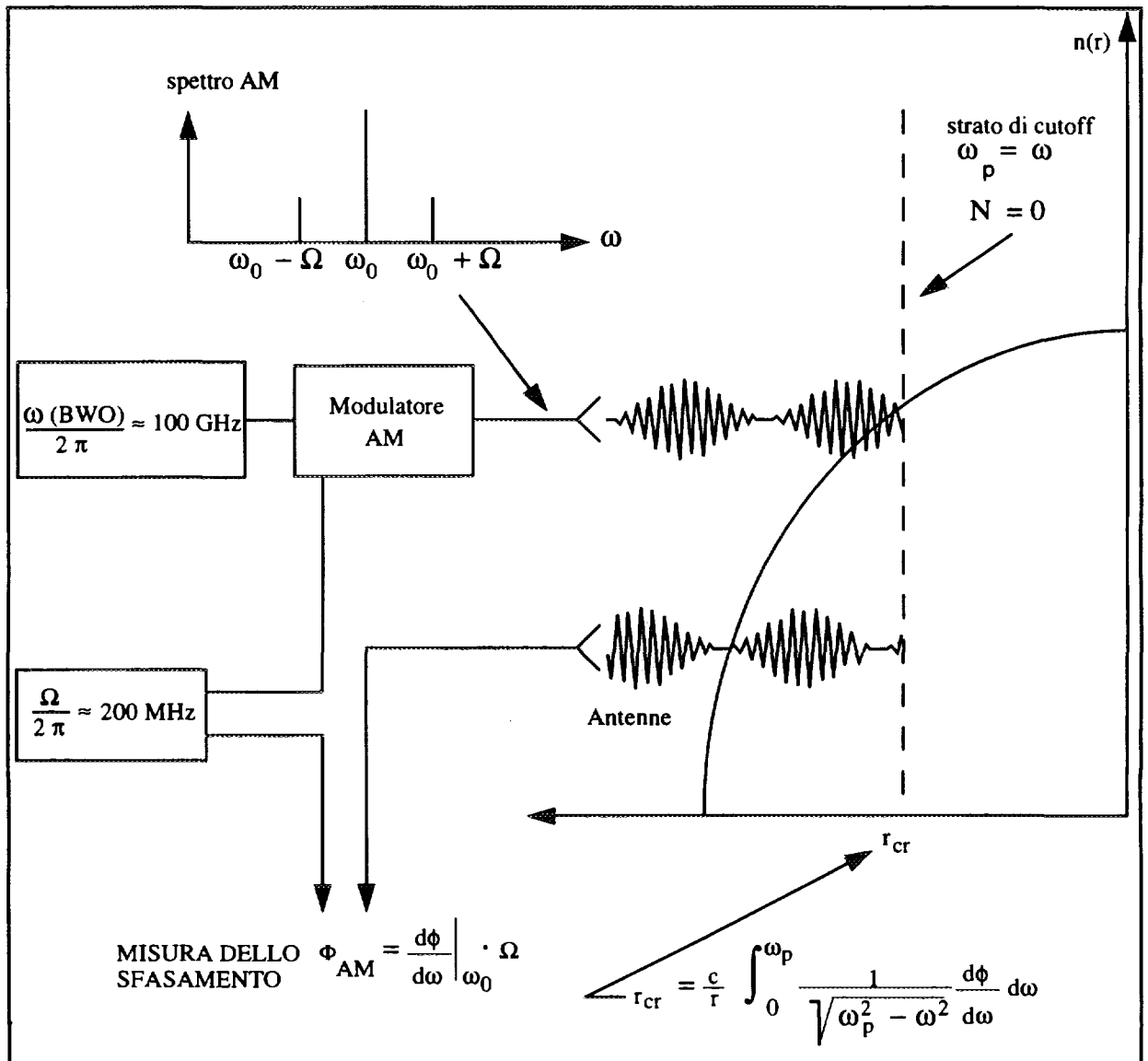


Fig. 2 - Schema di principio della riflettometria AM: l'onda emessa dal BWO (portante) viene modulata in ampiezza ottenendo uno spettro a tre righe e lanciata verso il plasma; misurando il ritardo di fase dell'involuppo AM sull'onda riflessa dal cutoff, per diversi valori di frequenza della portante e sfruttando le relazioni riportate è possibile ricostruire il profilo di densità del plasma.

Lo schema di principio di un riflettometro AM é riportato in figura 2.

I limiti principali della riflettometria come diagnostica di plasmi sono: l'impossibilit  di studiare interamente i profili di densit  non monotoni, l'assorbimento della radiazione alle frequenze di risonanza e l'interferenza con le onde evanescenti qualora queste sopravvivano fino a raggiungere di nuovo la condizione di propagazione ($N^2 > 0$). Inoltre per la propagazione ordinaria, non   possibile studiare le regioni esterne del profilo, dove la frequenza di plasma, e quindi di cutoff, tende a zero.

2 - LA DIAGNOSTICA DI RIFLETTOMETRIA AM PER FTU.

Il sistema riflettometrico AM per FTU [8,9]   stato realizzato in collaborazione con lo I.A.P. (Institute of Applied Physics di N. Novgorod - Russia) ed   composto di due distinti riflettometri. Questi sono montati in modo da consentire correlazioni radiali e toroidali dei segnali di fase, oltre alla misura dei profili di densit . L'intervallo di frequenze portanti disponibile   52-90 GHz, che corrisponde a densit  critiche $0.34-1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, nel modo ordinario (fig. 3). I due apparati differiscono soltanto per la frequenza di modulazione, che   stata fissata in 200 MHz per uno e 220 MHz per l'altro, per minimizzare gli effetti di "cross-talk". Le corrispondenti lunghezze d'onda risultano adeguate ad effettuare misure di fase non ambigue sui percorsi massimi previsti. Nel seguito, a meno di diversa indicazione, ci riferiremo al riflettometro da 200 MHz, essendo l'altro concettualmente identico.

Lo schema a blocchi di una linea di misura   mostrato in fig. 4. La radiazione generata da un Backward Wave Oscillator [10a] (BWO) viene modulata sinusoidalmente e lanciata verso il plasma da un antenna a corno piramidale. La radiazione riflessa raccolta da una seconda antenna a corno passa attraverso ad un rivelatore quadratico che ne estrae l'involuppo

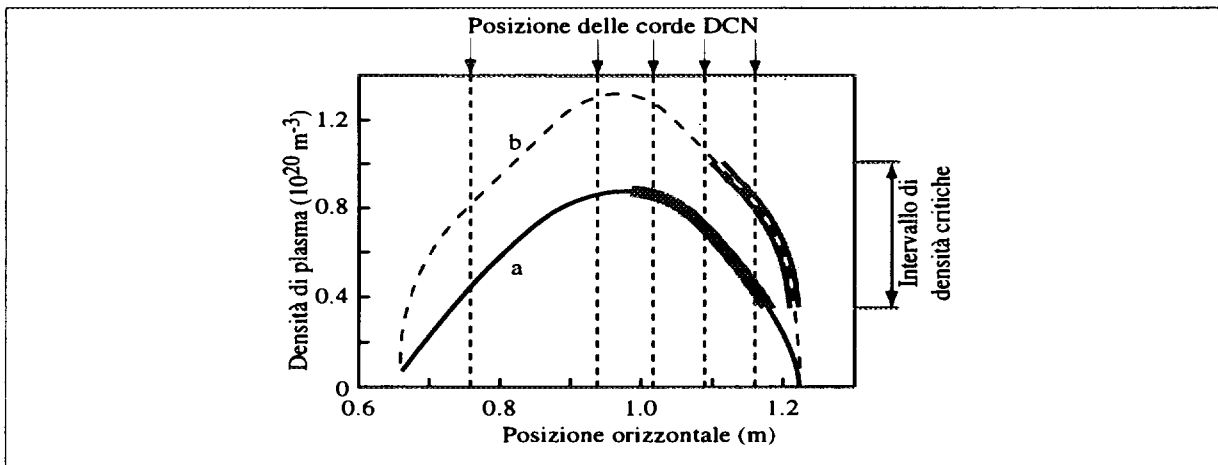


Fig. 3 - Due esempi di profili di densit  di FTU ottenuti effettuando l'inversione dei dati dell'interferometro DCN con il codice di equilibrio [20] di FTU, sono indicate le posizioni delle corde dell'interferometro DCN. Le regioni ombreggiate del profilo sono quelle raggiunte dal riflettometro. (a): #7635 $t=0.8 \text{ s}$; (b) #7656 $t=0.5 \text{ s}$

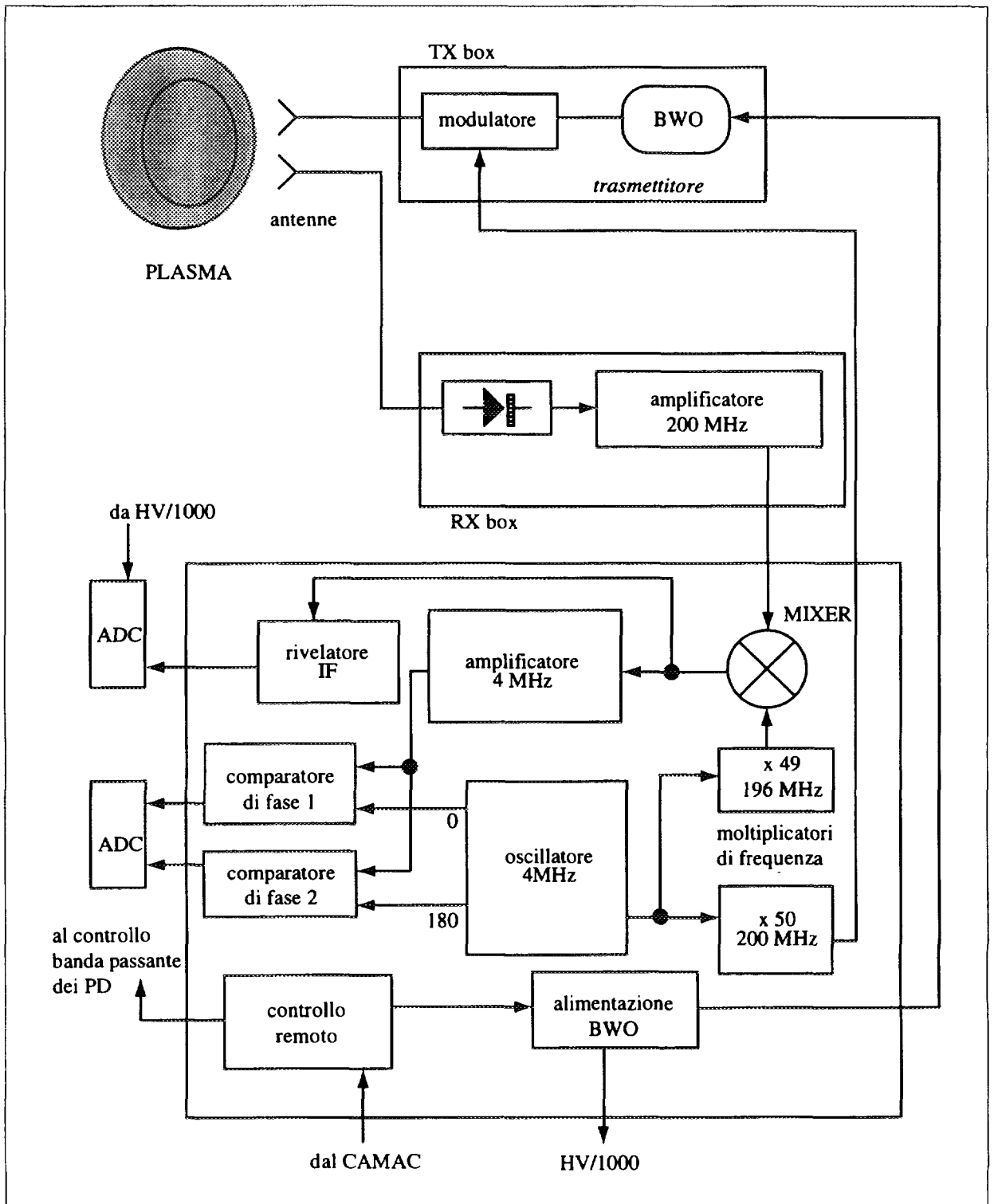


Fig. 4 - Schema a blocchi di una linea di misura del riflettometro AM su FTU.

modulante. Sottraendo alla fase dell'involuppo quella dell'onda modulante di riferimento e dividendo per la frequenza di modulazione, noti i ritardi introdotti dalle linee e dai componenti elettronici, si ottiene il ritardo riportato dall'onda durante il doppio percorso nel plasma. Variando la frequenza del BWO in otto passi pre-programmati, si ottiene il ritardo di fase AM in funzione della frequenza.

Sorgenti a microonde e modulatori

Per ciascun riflettometro la radiazione portante è generata da un BWO, la cui potenza di uscita media è di circa 30 mW, con 4 dB di non uniformità sull'intera banda di frequenze. Nell'attuale disposizione la frequenza del BWO varia tra 53 GHz e 86 GHz al variare della tensione di alimentazione tra 400 V e 1500 V. Il generatore può emettere radiazione a frequenza fissa oppure variare la frequenza con due distinte modalità. Nella prima, detta scansione veloce, la frequenza varia ciclicamente tra otto diversi valori preselezionati manualmente; il tempo di transizione tra un valore all'altro è minore di 0.5 ms ed è determinato dal generatore di alta tensione piuttosto che dal BWO. Nella seconda, detta scansione lenta, l'alta tensione di alimentazione è controllata da un DAC (12 bit) interno che permette una variazione di frequenza a salti di 15 MHz ogni 10 ms. Il BWO può essere controllato in modo remoto via CAMAC. Per monitorare la frequenza emessa istante per istante si ha a disposizione una tensione il cui valore è l'1‰ del valore dell'alta tensione del BWO (V_{HV}). La modulazione in ampiezza (la profondità di modulazione [11] varia tra il 20% e il 40% su tutta la banda) è ottenuta inviando la radiazione ad un diodo PIN [10b,12] la cui giunzione è alimentata alla frequenza voluta (200 MHz o 220 MHz), ottenuta mediante moltiplicazione in frequenza di un'onda a 4 MHz generata da un oscillatore a quarzo. Un isolatore a ferrite [13] protegge il BWO dalle onde riflesse con un'attenuazione di 30 dB. Il BWO, il modulatore di ampiezza e l'isolatore sono contenuti in un contenitore metallico (TX-box in figura 4) a sua volta racchiuso in un cilindro di ferro ARMCO per schermare il campo magnetico ambientale prodotto da FTU.

Antenne e guide d'onda

Per permettere una buona trasmissione della radiazione e contenere l'effetto delle riflessioni parassite per una larga banda di frequenze, si utilizzano due linee di trasmissione separate che sono costituite da guide d'onda in rame di sezione rettangolare di dimensioni (5.2×2.6) mm² e lunghezza totale di 5 m circa. Si utilizzano guide sovrarmode [14] per evitare un'eccessiva attenuazione dell'onda; per il modo fondamentale TE₀₁, utilizzato per le misure, l'attenuazione non supera 1.2 dB/m su tutta la banda di lavoro, mentre è notevolmente maggiore per i modi superiori, che in tal modo risultano parzialmente filtrati rispetto al fondamentale; per limitare la conversione di modi, che sottrae energia al fondamentale, il raggio di curvatura delle guide non deve essere minore di 50 cm nel piano H (lato più lungo delle guida) e 20 cm nel piano E (lato più corto).

Le finestre da vuoto sono realizzate con un piccolo tratto di guida a sezione circolare, di raggio 2.6 mm, in cui è inserita una barretta di quarzo ed introducono un'attenuazione del segnale di circa 3 dB.

Per prevenire l'accoppiamento diretto tra l'antenna trasmittente e quella ricevente, si utilizzano antenne piramidali [15] con doppia apertura angolare. L'accoppiamento diretto tra le due antenne, stimato da misure di interferenza, risulta minore di -50 dB.

Rivelazione del segnale

Il segnale riflesso è rivelato da un diodo Schottky [16,17a] la cui giunzione è polarizzata in DC per ottenere il miglior rapporto segnale-rumore, in corrispondenza della regione di lavoro quadratica [11] utilizzata. Il segnale rivelato è amplificato di 60 dB da due amplificatori in cascata tra i quali è inserito un filtro passa banda con un larghezza di 25 MHz per ridurre i segnali spuri dovuti al secondo riflettometro ed alle armoniche della frequenza modulante. Il rivelatore e gli amplificatori sono contenuti in un secondo contenitore metallico (RX-box in figura 4)

Misura della fase

Il segnale a 200 MHz è miscelato [17b] con un segnale locale (LO) a 196 MHz ottenuto moltiplicando in frequenza l'uscita dello stesso oscillatore a quarzo che pilota il modulatore. In tal modo si ottiene per differenza un segnale alla frequenza intermedia (IF) di 4 MHz, che conserva il ritardo di fase di quello riflesso. Il segnale di IF viene amplificato ed inviato ad un comparatore di fase digitale (PD), costituito da componenti ECL (Emitter-Coupled Logic), che ne misura lo sfasamento prodotto dalla propagazione nel plasma e nelle guide, rispetto al riferimento proveniente dall'oscillatore a quarzo. Un ultimo amplificatore DC produce un segnale in tensione proporzionale allo sfasamento: un ritardo di fase di 2π produce una variazione di 3.5 V. All'uscita del PD è disposto un filtro RC passa-basso, con frequenza di taglio regolabile tra 10 e 100 KHz. Per ritardi di fase prossimi a multipli di 2π si osserva una degenerazione della linearità del comparatore dovuta alle caratteristiche dei componenti ECL, che rende impossibile la misura di fase. Per ovviare a tale limitazione, il riflettometro è stato dotato di un secondo PD, il cui segnale di fase è ritardato elettronicamente di π rispetto al primo PD: di volta in volta si sceglie l'uscita di fase che rientra nella zona lineare della caratteristica tensione-fase. L'accuratezza del PD è migliore di 0.02 rad che nel vuoto corrisponde ad una distanza di 2.4 mm.

Parte del segnale IF è inviata ad un rivelatore lineare di ampiezza, la cui uscita V_{IF} è proporzionale alla potenza ricevuta, poiché il segnale IF era stato ottenuto da un rivelatore quadratico. Tale segnale viene utilizzato per valutare se la potenza ricevuta è nell'intervallo di funzionamento ottimale del comparatore di fase (0.2 V - 2.4 V).

3 - PROVE DI LABORATORIO

Interpretazione del segnale di uscita del PD

L'andamento del segnale di fase in funzione della distanza delle antenne da un riflettore metallico é stato misurato per tutti i canali dei due riflettometri. La distanza tra la superficie riflettente e le antenne é stata misurata da un encoder accoppiato meccanicamente con lo specchio: gli impulsi dell'encoder, equidistanti spazialmente, sono stati utilizzati come clock per l' ADC a 12 bit impiegato per acquisire l'uscita del PD; in tal modo non é stato necessario provvedere ad una scansione dello specchio a velocità costante.

Le caratteristiche costruttive del riflettometro implicano la seguente relazione tra ritardo di fase ϕ dovuto al doppio percorso tra specchio ed antenne e tensione di uscita V_1 del PD:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\Delta V} (V_1 - \Delta V) - \phi_0 + 2n\pi \quad (3.1)$$

dove il termine ϕ_0 contiene il contributo allo sfasamento dovuto al percorso in guida e ad eventuali offsets elettronici e ΔV è la tensione massima di 3.5 V all'uscita dall'ultimo stadio di misura. Si osserva (fig. 5a) che l'andamento del segnale di fase é perturbato da un'oscillazione quasi-sinusoidale molto evidente quando il riflettore é vicino alle antenne, e che produce dei salti di frangia, o transizioni, quando il ritardo di fase é vicino a 2π . Mediando su tali oscillazioni si può evidenziare la non linearità intrinseca del comparatore che risulta essere dell'ordine di 0.2 rad (corrispondente ad un errore sulla posizione di circa 2 cm in aria) in prossimità delle transizioni, mentre per distanze specchio-antenne maggiori di 15 cm scende a 0.02 rad, circa 2.4 mm in aria.

L'oscillazione spuria sul segnale di fase, il cui periodo corrisponde alla semilunghezza d'onda della portante (fig. 5b), può essere attribuita all'interferenza tra il segnale riflesso principale e quelli spuri prodotti dall'accoppiamento diretto tra le antenne o da doppia riflessione sulle antenne e sulle strutture metalliche circostanti. Con tale modello l'errore sulla fase introdotto dal segnale parassita di ampiezza relativa $\epsilon = (\text{amp. spuria})/(\text{amp. principale})$, risulta essere:

$$\delta\Phi \approx \epsilon \cos\omega \frac{2x}{c} \quad (3.2)$$

dove x é la distanza tra le antenne e lo specchio e c la velocità della luce. Poiché ampiezza del segnale principale é inversamente proporzionale alla distanza, l'effetto dell'accoppiamento diretto, ovvero di un segnale spurio costante, fornirebbe $\epsilon \propto x$, in contrasto con i risultati sperimentali mostrati in fig 5; assumendo che l'oscillazione a grandi distanze sia dovuta al solo accoppiamento diretto tra le antenne, si può stimare un limite superiore di circa -56 dB per tale effetto.

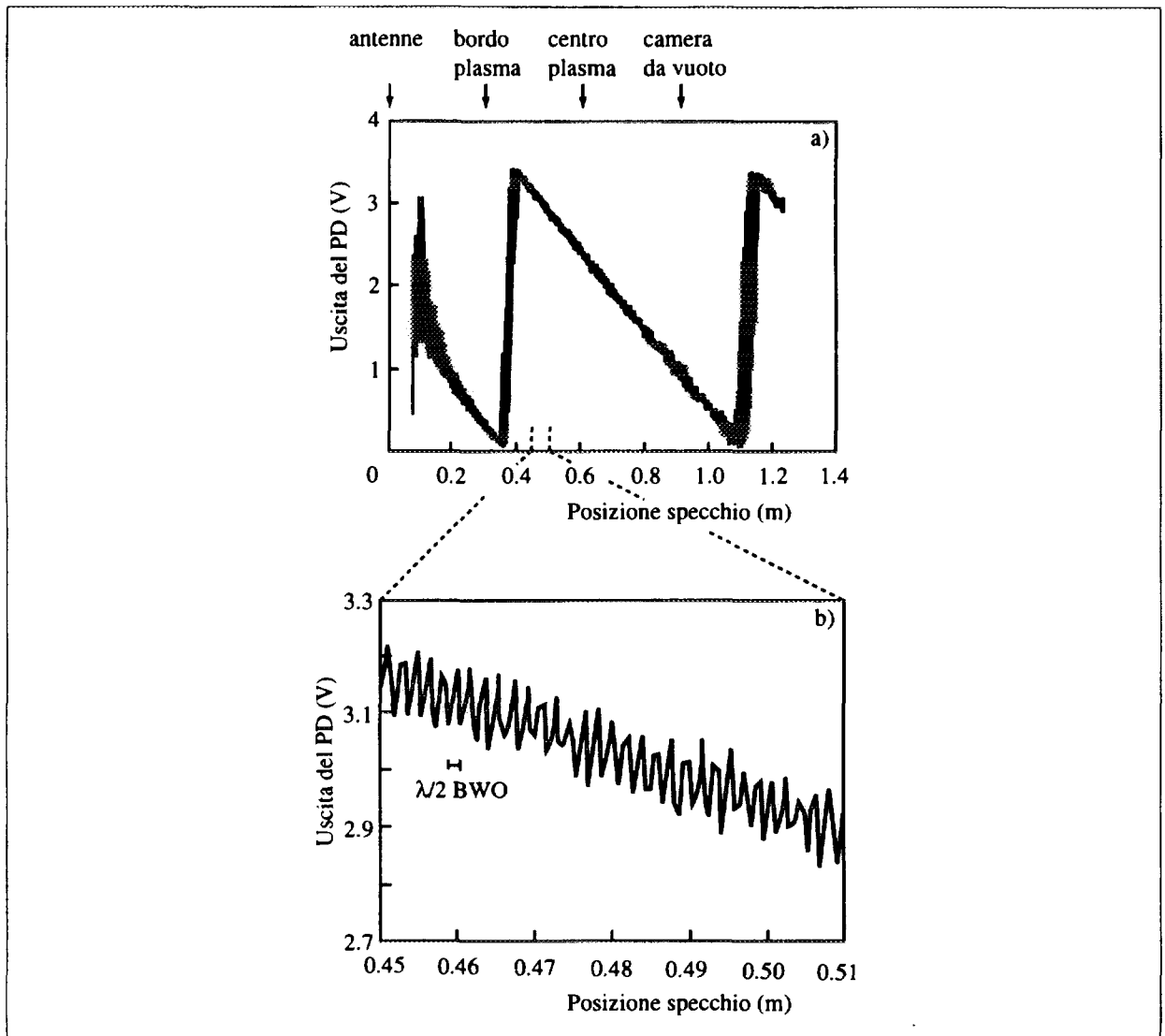


Fig. 5 - (a) Andamento del segnale di uscita del PD (volt) misurato in funzione della distanza tra specchio ed antenne, a frequenza fissa (81.5 GHz). Sono indicate le posizioni delle antenne, del plasma e della parete interna della camera da vuoto. In prossimità delle transizione $0-2\pi$ (tensione di 0 V o 3.5 V) la fase deve essere misurata dalla seconda uscita del PD. (b) Espansione del grafico (a) in cui sono evidenti le oscillazioni spurie.

Per effetto di doppia riflessione su un oggetto di sezione riflettente S , l'ampiezza relativa del segnale spurio é:

$$\epsilon = \frac{Sv}{2cx} \cos\left(\frac{2\Omega x}{c}\right) \quad (3.3)$$

utilizzando questa relazione per stimare la superficie S con i dati della zona lineare della caratteristica ($x=90$ cm), si trova $S=8$ cm², consistente con la sezione delle antenne del riflettometro.

Nella regione di lavoro, individuata dal centro e dal bordo del plasma, l'errore sulla distanza nel vuoto é di ± 1 cm; nel plasma dovrebbe diventare trascurabile per la sua bassa riflettività [18] e può essere ulteriormente ridotto dall'effetto di media sui piccoli spostamenti della colonna di plasma.

In linea di principio é possibile ridurre l'effetto delle spurie riducendo la sezione delle antenne; in generale la piccola ambiguità introdotta dal segnale spurio può essere rimossa variando la frequenza della portante su una stretta banda (1 GHz). Questa tecnica verrà applicata, se necessario, per ridurre l'errore nella determinazione dell'offset di fase per riflessione sulla parete interna della camera toroidale, adoperando il BWO nel modo di operazione a scansione lenta (par. 2).

Selezione del segnale di fase

La differenza tra i segnali d'uscita dei due PD del riflettometro é, come detto in precedenza, costante ed uguale a π (fig. 6); questo non si verifica se uno dei due lavora in zona non lineare.

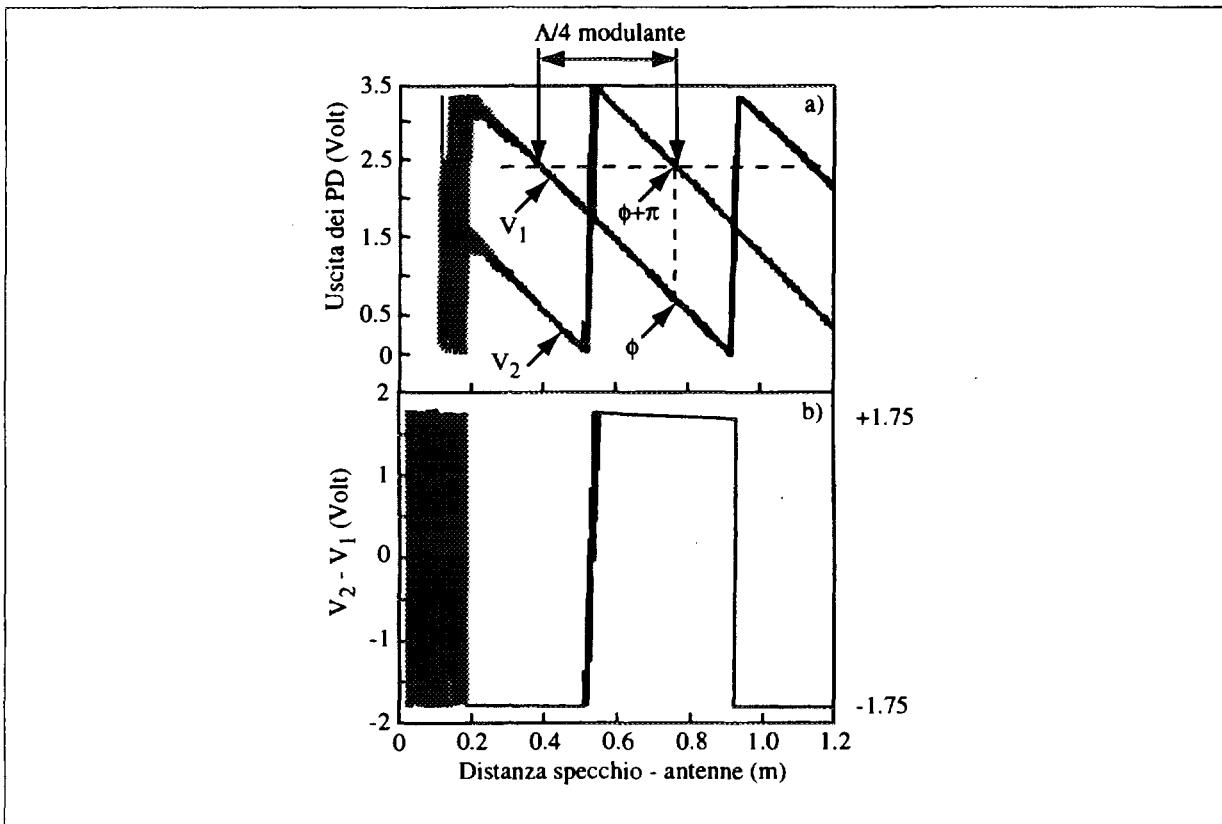


Fig. 6 - (a) Andamento del segnale di uscita V_1 e V_2 dei due PD durante la scansione di uno specchio metallico piano. (b) Differenza tra le due tracce: escludendo gli intervalli prossimi ai salti di frangia, il valore é ± 1.75 V corrispondente alla differenza di fase di π imposta costruttivamente tra i due PD; la frequenza del BWO é 85.3GHz.

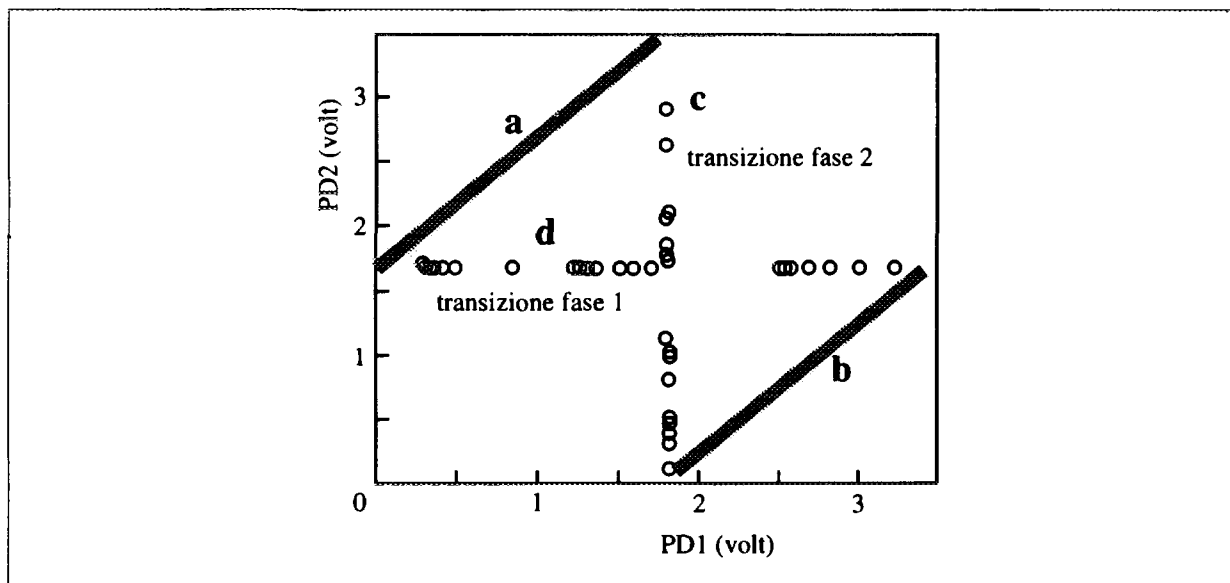


Fig. 7 - Diagramma a farfalla; le zone indicate con (a) e (b) corrispondono all'andamento lineare di entrambe le fasi, le zone (c) e (d) indicano la transizione della fase 2 e della fase 1, rispettivamente.

Per illustrare in modo chiaro il criterio di scelta dell'uscita del PD che contiene informazioni utilizzabili, si possono graficare i dati del primo PD in funzione di quelli del secondo, ottenendo il diagramma "a farfalla" mostrato in figura 7; quando uno dei due PD è in transizione i dati corrispondenti assumono valori compresi tra 0 e 3.5 V, originando i tratti perpendicolari tra di loro del diagramma: in tale condizione si deve scegliere l'altro PD; sui tratti obliqui invece la relazione $PD2=PD1+\pi$ è soddisfatta ed entrambi i PD forniscono dati significativi

Caratteristica del BWO

La frequenza della radiazione emessa dal BWO è determinata dal valore della tensione di alimentazione. Utilizzando un frequenzimetro per microonde in banda E (60-90 GHz) è stata misurata la caratteristica frequenza-tensione per i canali preselezionati dei riflettometri. Nella tabella che segue l'indice 1 si riferisce al riflettometro a 200 MHz, l'indice 2 a quello a 220 MHz. Poiché le frequenze dei canali 6 e 7 del primo riflettometro, si trovano al di fuori della banda E, per stimarle si è utilizzato il periodo delle oscillazioni spurie del segnale di fase durante le scansioni dello specchio metallico. Questo non è stato possibile per canale 7 del secondo riflettometro, data la rumorosità del segnale.

canale	$V_{HV1} \pm 0.01$ (V)	ν_1 (GHz)	$V_{HV2} \pm 0.01$ (V)	ν_2 (GHz)
0	3.36	85.30 ± 0.03	2.69	85.30 ± 0.03
1	2.99	81.47 ± 0.03	2.55	83.55 ± 0.03
2	2.69	78.20 ± 0.03	2.19	78.65 ± 0.03
3	2.24	72.62 ± 0.03	2.01	76.15 ± 0.03
4	1.86	67.42 ± 0.03	1.70	71.10 ± 0.03
5	1.66	64.32 ± 0.03	1.53	68.10 ± 0.03
6	1.36	59.6 ± 0.2	1.14	60.60 ± 0.03
7	1.03	55.5 ± 0.04	0.960	----

Rumore del PD

Il segnale d'uscita dei PD per ritardi di fase costanti, presenta un rumore intrinseco legato a diverse cause; é presente un'oscillazione ad alta frequenza (alcune decine di kHz) la cui ampiezza, nella configurazione che si adotta su FTU, varia da 40 mV a 80 mV, sovrapposta a spikes di ampiezza che varia tra 118 mV e 250 mV, la cui frequenza di ripetizione é 100 Hz.

Nel primo caso si tratta di oscillazioni interne alla catena elettronica, dovute probabilmente ad effetti di basso segnale, come conferma l'aumento dell'ampiezza del rumore quando $V_{IF} < 50$ mV. Nel secondo caso i disturbi sono evidentemente prodotti da effetti induttivi tra i PD e la sezione di alimentazione ad alta tensione. L'effetto di questi disturbi sulle misure dei profili di densità puo` comunque essere eliminato riducendo la banda passante del segnale acquisito, con una media sullo stesso per tempi di 1 ms circa.

Si é inoltre osservata un'instabilità della potenza del BWO, con conseguente rumore propagato ai PD, in corrispondenza di elevati valori dell'intensità della radiazione di ritorno; questo é probabilmente legato ad un imperfetto funzionamento dell'isolatore, ma grazie ancora al basso livello del segnale riflesso dal plasma, l'effetto é di scarso rilievo per le misure in FTU.

4 - ACQUISIZIONE E CONTROLLO

Il sistema di controllo ed acquisizione dati del riflettometro é stato disegnato come componente del più generale sistema di acquisizione dati di FTU [19].

In questa architettura il colloquio fra strumenti ed unità di elaborazione (μVax) avviene attraverso moduli standard CAMAC. La configurazione dei moduli hardware é registrata prima della fase sperimentale in uno dei database di FTU (tabelle hardware), e caricata nei moduli al momento della inizializzazione del sistema. Al termine della sperimentazione i dati sono organizzati in un file secondo le informazioni contenute nel database delle tabelle software (o "tabelle di canale", a causa della relazione con la sorgente dei dati) relative a ciascuna misura. I

dati sono resi disponibili agli sperimentatori mediante routines di elaborazione numerico-grafiche.

La configurazione del sistema di acquisizione dati usata per la diagnostica é schematizzata in fig. 8. Il segnale prodotto dai due rivelatori di fase di ciascun riflettometro é registrato da un ADC LeCroy 6810 a 12 bit dotato di un banco di memoria di 512 Kb, e campionato in un intervallo di frequenze compreso fra 50 e 250 kHz.

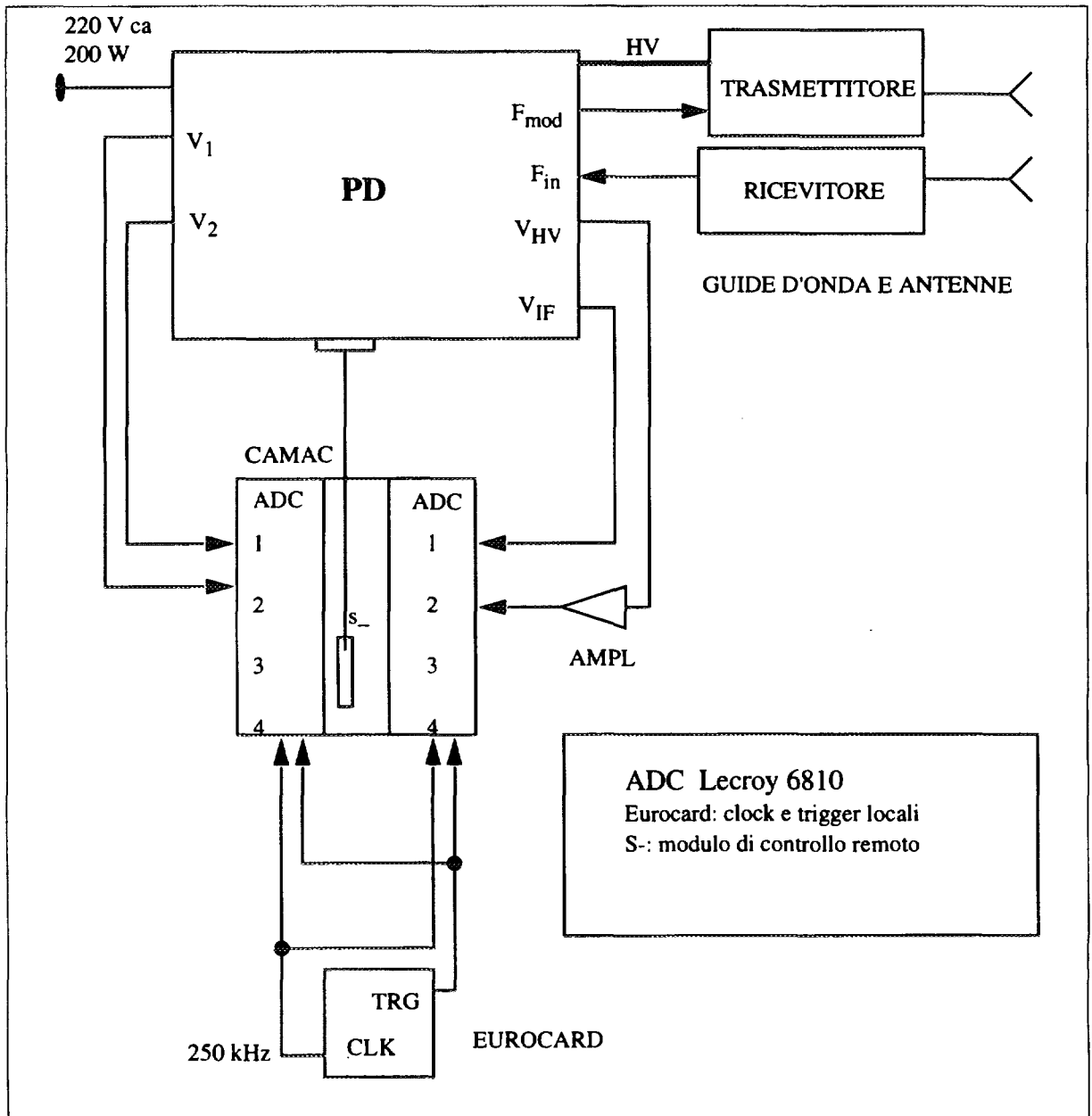


Fig. 8 - Schema del sistema di acquisizione dei riflettometri di FTU.

Un secondo ADC 6810 é stato utilizzato per registrare i segnali di V_{IF} e di V_{HV} utilizzato per ricostruire istante per istante il valore della frequenza della radiazione emessa dall'oscillatore. Le frequenze di campionamento sono esterne, per garantire la sincronizzazione con il clock principale di FTU, generate da un modulo Eurocard. I moduli ADC sono controllati da processi coordinati dal monitor del DAS (Data Acquisition System) di FTU, sia nella fase di inizializzazione che in quella di acquisizione dei dati.

Ciascun riflettometro é dotato di una porta (s-port) attraverso la quale sono impostati parametri e modalit  operative dello strumento; inoltre, il controllo delle operazioni nella configurazione attuale avviene esclusivamente via software, con istruzioni codificate nello standard CAMAC. Per garantire l'integrazione con FTU, si é pensato di trattare formalmente la s-port ed il sistema operativo dei riflettometri come un qualunque modulo hardware, utilizzando cio  gli strumenti messi a disposizione dal sistema di controllo ed acquisizione dati di FTU. Quindi, in analogia con la modulistica esistente, anche la configurazione dei riflettometri é stata registrata in una tabella hardware, un esempio della quale é riportato nel seguito. E' opportuno sottolineare, comunque, che il software di controllo degli strumenti é completamente indipendente dal monitor del DAS.

L'oscillatore produce radiazione in tre diverse modalit : frequenza fissa, scansione di frequenza lenta (slow sweeping), scansione di frequenza veloce (fast sweeping). Nella campagna sperimentale sono state utilizzate la modalit  a frequenza fissa e la scansione veloce, nella quale sono scandite ciclicamente le otto frequenze corrispondenti ai canali preselezionati manualmente.

Durante la fase iniziale della sperimentazione il programma inizializza il modulo con le informazioni contenute nella tabella hw corrispondente, e si mette in attesa di un segnale hardware che viene emesso 10 secondi prima dello zero di plasma (gate FSC). Il segnale a frequenza fissa prodotto dall'oscillatore é inviato alla camera a 300 ms dallo zero di plasma; dopo un tempo T_1 il segnale é commutato a frequenza variabile, con una durata media delle rampe di 0.5 ms, fino alla fine della sperimentazione.

*tabella hardware***S_PORT Modulo CAMAC IAP (riflettometro)**

HD01 Filtro : 0 - 10 kHz
 1 - 20 kHz
 2 - 50 kHz
 3 - 100 kHz

HD02 Banda per il "fast sweeping" (0 - 7)

HD03 Modalita' operativa: = 0 - fast sweeping
 <>0 - slow sweeping

HF01 Durata dello scan a frequenza fissa (ms)

HF02 Durata dello scan a frequenza variabile (ms)

HF03 Durata di ciascuna rampa (ms)

HF04 Tempo di avvio del riflettometro prima dello sparo

5 - PRIMI RISULTATI SPERIMENTALI

Nel seguito vengono illustrati e preliminarmente discussi alcuni dati sperimentali ottenuti col riflettometro nella campagna sperimentale di FTU durante la primavera-estate 1994. I dati si riferiscono al riflettometro con frequenza AM di 200 MHz.

Calibrazione assoluta

Per effettuare la calibrazione assoluta della fase misurata dai riflettometri, si é utilizzata la formula 3.1 riscrivendola per semplicita' nel modo seguente:

$$\phi = -\frac{V_1}{\Delta V} 2\pi + \phi_0' \quad (4.1)$$

in tal modo il termine ϕ_0' , ancora espresso in radianti, congloba l'effettivo offset di fase, i fattori di scala elettronici e l'eventuale multiplo di 2π dovuto a ritardi di fase maggiori di una

frangia. Per calibrare si misura la tensione V_1 fornita dal PD in corrispondenza di un ritardo di fase ϕ_p noto, legato ad esempio ad un riflettore metallico posto ad una fissata distanza dalle antenne. La tabella che segue riporta i risultati ottenuti con i dati relativi alla riflessione sulla camera da vuoto interna di FTU (fig. 1). Nei casi indicati con asterisco il segnale era troppo debole per poter effettuare la lettura ($V_{IF} < 20$ mV), sono stati quindi utilizzati dati ottenuti da scariche di plasma con la tecnica descritta nel seguito.

canale	f_0 (rad)
0	7.5
1	8.4
2	8.3
3	6.6*
4	7.0
5	5.5*
6	5.6
7	5.3*

Validazione generale delle misure di fase

In figura 9 sono riportate le evoluzioni temporali della fase AM in due diverse scariche, caratterizzate da bassa densità (#7955) ed alta densità (#8000); in entrambe il riflettometro è regolato sul canale 0 (85.30 GHz), con frequenza fissa. Per $t < 0$, ovvero in assenza di plasma, la fase è costante e rappresenta il ritardo dovuto al percorso della radiazione tra le antenne e la parete interna del tokamak. Per $0 < t < 0.2$ s, istante in cui la densità raggiunge il valore critico associato alla frequenza della radiazione incidente, l'onda continua ad essere riflessa dalla parete interna della camera ma a causa degli effetti dispersivi del plasma l'intensità riflessa diminuisce (fig. 9b); lo sfasamento AM in questo regime interferometrico aumenta (fino a divergere) a causa della diminuzione dell'indice di rifrazione (di fase) e quindi della velocità di gruppo, all'aumentare della densità; questo effetto si manifesta con una serie di salti di frangia [7] in prossimità di $t=0.2$ s. Alla nascita dello strato riflettente (simultanea per le due scariche), il ritardo di fase presenta un'ultima brusca diminuzione, stabilizzandosi sul valore determinato dalla riflessione sullo strato situato vicino al centro della camera ed in seguito rimane quasi costante nella scarica 7955 data la stazionarietà della densità (fig. 9c) mentre diminuisce nella scarica 8000 a causa dell'aumento della densità e conseguente avvicinamento dello strato riflettente verso l'esterno della camera e quindi alle antenne. Coerentemente con questa interpretazione l'intensità riflessa varia di poco nella prima scarica (7955) ed aumenta decisamente nella seconda (fig. 9b). E' da notare che il ritardo di fase misurato per $t < 0$ e dovuto alla riflessione sulla camera da vuoto, risulta minore di quello ottenuto per riflessione sul plasma, pur essendo in quest'ultimo caso il riflettore più vicino alle antenne. Questo è determinato dal fatto che evidentemente tra i due casi si verifica un salto di frangia e quindi la

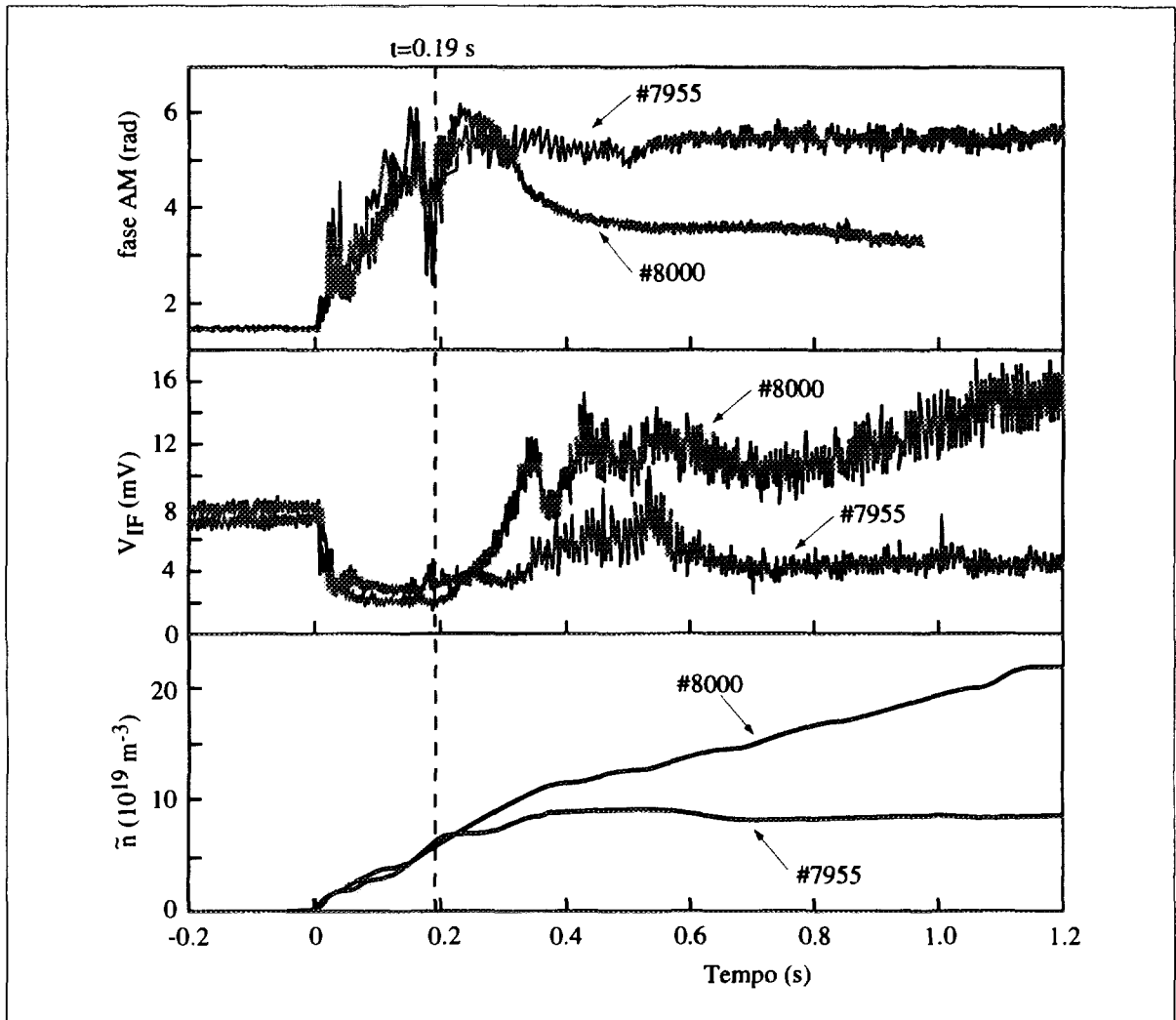


Fig. 9 - Confronto per gli spari #7955 (bassa densità) ed #8000 (alta densità) tra i segnali (a) fase misurata Φ_{AM} , (b) intensità riflessa V_{IF} , (c) andamento temporale della densità media di linea centrale ottenuta dall'interferometro DCN. I segnali del riflettometro sono mediati su un intervallo di 1 ms; la frequenza del BWO è fissata su 85.30 GHz.

fase corrispondente al riflettore più lontano (camera da vuoto) deve essere incrementata di 2π per ottenere il valore assoluto.

Simulazione del ritardo di fase AM nel plasma

Il ritardo di fase dovuto al passaggio della radiazione attraverso il plasma, può essere valutato risolvendo numericamente le equazioni 1.5 ed 1.8 a partire da un profilo di densità noto. Assumendo un profilo di densità parabolico [18] l'integrale è risolvibile analiticamente;

indicando con F il rapporto tra la frequenza incidente e la frequenza di plasma al centro del profilo ($F = \omega/\omega_p(r_0)$) si ottengono le relazioni:

in regime riflettometrico:

$$\Phi = \Omega \cdot F \cdot \frac{a}{c} \ln\left(\frac{1+F}{1-F}\right) + \Phi_1 \quad \Phi_1 = \frac{2\Omega}{c}(r_0 + a - r_{\text{ant}}) \quad (4.2)$$

in regime interferometrico (cutoff assente):

$$\Phi = \Omega \cdot F \cdot \frac{2a}{c} \ln\left(\frac{1+F}{1-F}\right) + \Phi_1 \quad \Phi_1 = \frac{2\Omega}{c}(r_w + a - r_0) \quad (4.3)$$

Ripetendo il calcolo ad ogni istante in cui è disponibile la densità al centro del plasma, misurata con l'interferometro DCN, si ottiene una simulazione dell'andamento della fase AM ottenibile con il riflettometro operante a frequenza fissa.

In figura 10 sono riportati i confronti della fase AM misurata da entrambi i PD e calcolata con la tecnica prima descritta, nella scarica 7980; gli andamenti risultano in buon accordo; le piccole discrepanze si possono attribuire alle differenze tra il vero profilo di densità e quello parabolico assunto per la simulazione.

Il valore del ritardo di fase AM calcolato durante un intervallo stazionario della scarica, può

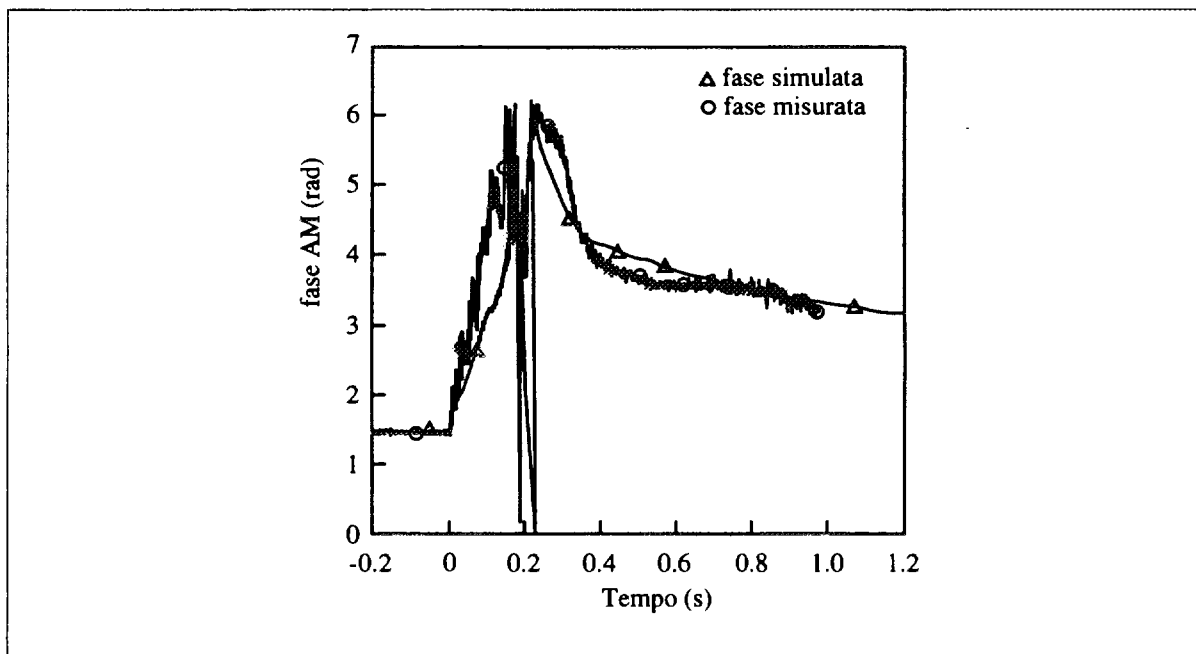


Fig. 10 - Confronto tra l'evoluzione temporale misurata del segnale di fase AM con il riflettometro a frequenza fissa (85.30 GHz) e quella simulata assumendo un profilo di densità parabolico [23], durante la scarica #8000. I segnali sperimentali sono mediati su un intervallo di 1 ms.

essere utilizzato per la calibrazione descritta nel paragrafo precedente qualora il segnale riflesso dalla camera da vuoto in assenza di plasma risulti insufficiente.

Esempi

La figura 11a mostra l'andamento dei segnali del riflettometro, con frequenza portante di 85.30 GHz, nella scarica 8002; per $1.0 \leq t \leq 1.08$ s si verifica un piccaggio della densità a seguito di un distacco del plasma dal limiter; durante questo fenomeno il valore misurato del ritardo di fase AM é in accordo con quello simulato ottenuto utilizzando i profili di densità ottenuti dall'inversione dei dati dell'interferometro DCN con i codici di equilibrio, piuttosto che un profilo di densità parabolico. L'aumento di livello di V_{IF} può essere attribuito ad una riduzione degli effetti di rifrazione dovuta al cambiamento nel profilo di densità.

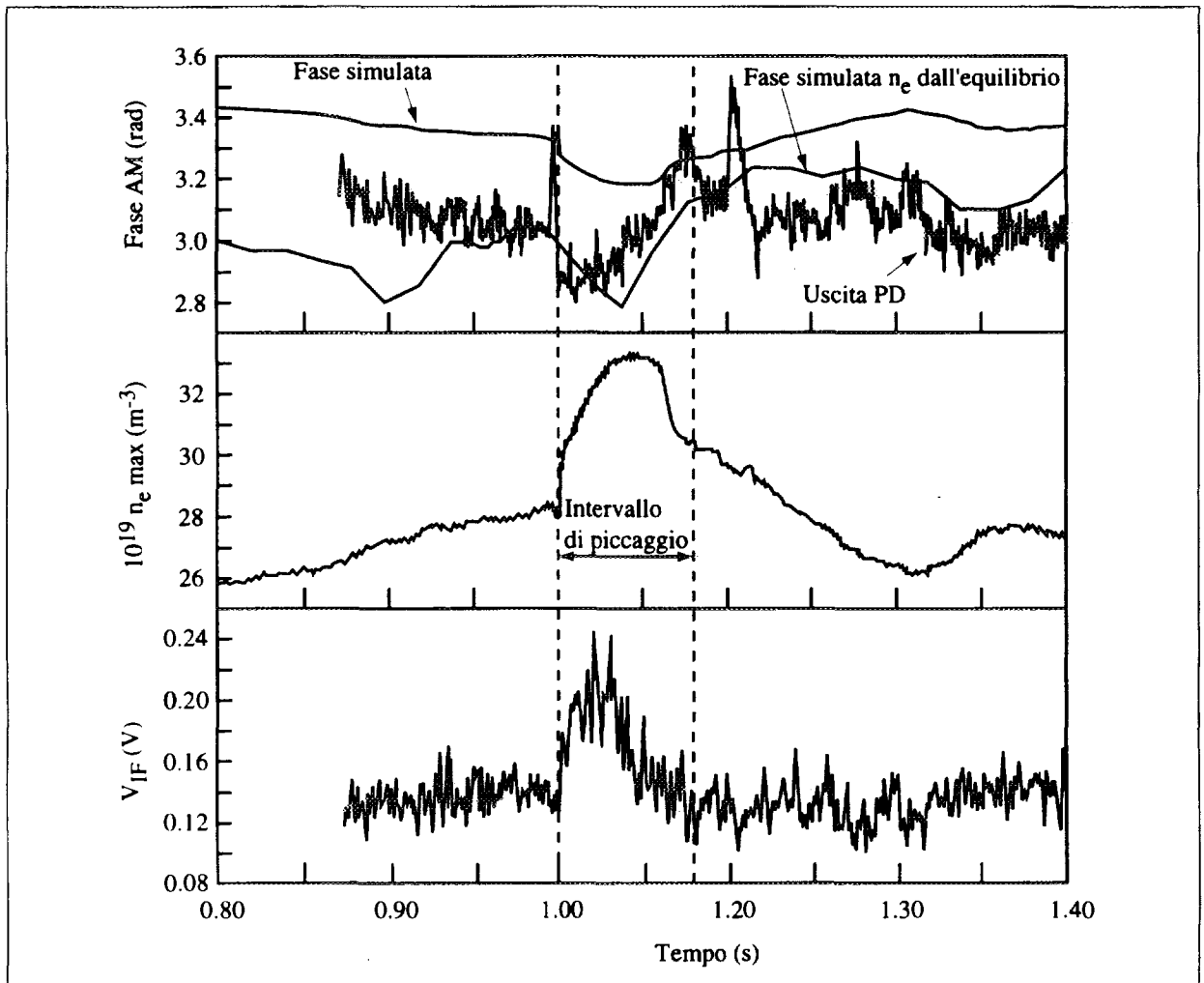


Fig. 11 - Andamento della fase AM durante un piccaggio di densità a seguito di un distacco del plasma dal limiter (#8002) e confronto con andamenti simulati assumendo un profilo di densità parabolico o utilizzando quello ottenuto dalle misure dell'interferometro DCN con codici di equilibrio [23]. I segnali sperimentali sono mediati su un intervallo di 1 ms; la frequenza del BWO é fissata su 85.30 GHz.

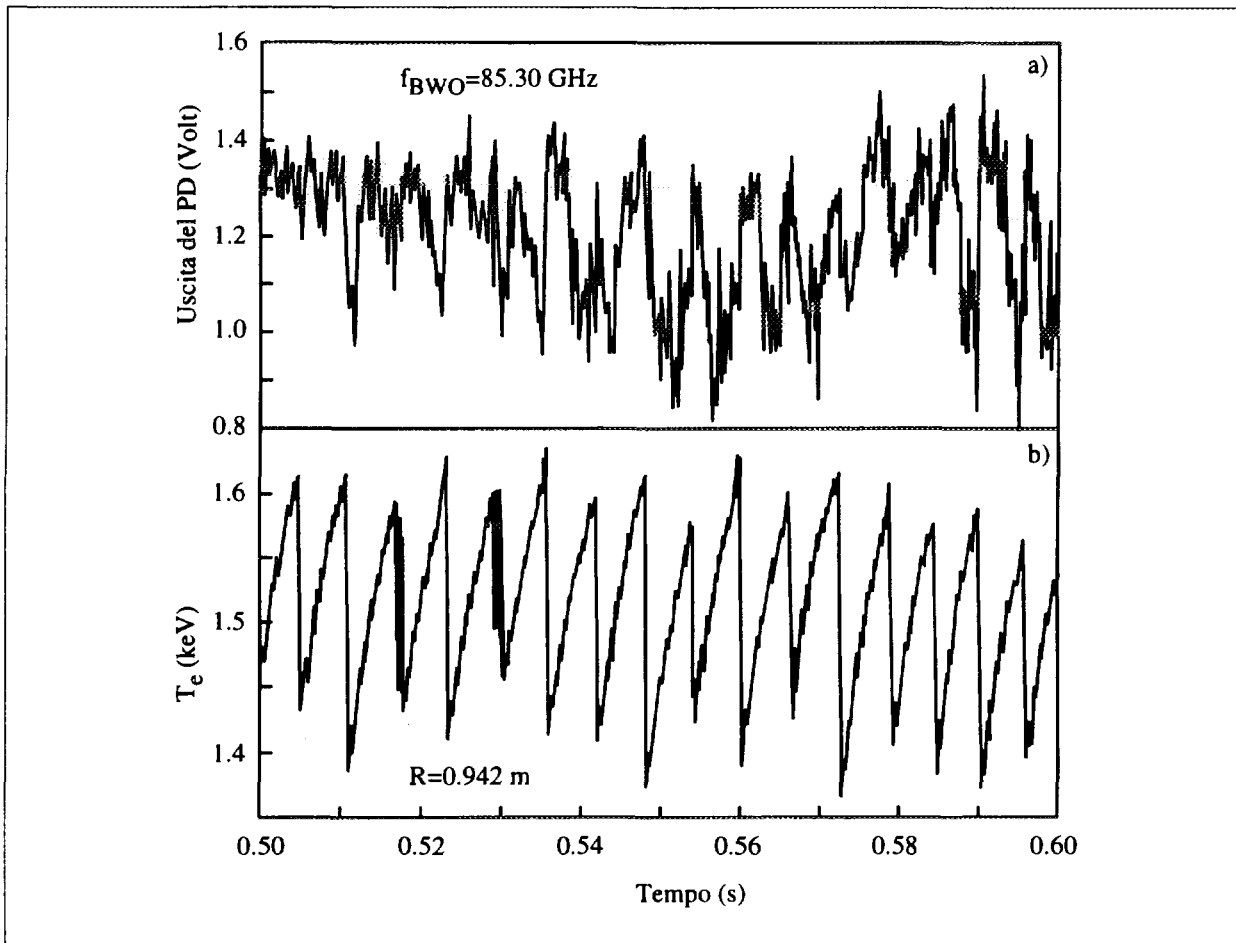


Fig. 12 - Confronto [23] tra le oscillazioni della fase AM (a) e le oscillazioni di temperatura a dente di sega rivelate dal policromatore ECE (b) nella scarica #7987. I segnali del riflettometro sono mediati su un intervallo di 1 ms.

Nella scarica 7987, con frequenza della portante 85.30 GHz, la fase AM relativa allo strato riflettente situato circa al centro della scarica, presenta la stessa oscillazione a dente di sega rivelata dal canale del policromatore ECE relativo alla stessa posizione (fig. 12).

I dati della relativi alla scarica 7997 (fig. 13) forniscono un'indicazione della capacità del riflettometro di misurare le fluttuazioni di densità. Il rumore sulla fase AM (fig. 13a) si riduce sensibilmente dopo la comparsa dello strato riflettente, successivamente si osserva un nuovo aumento dell'ampiezza del rumore, per $t > 0.55$ s; in questa fase anche il segnale di $H\alpha$ aumenta, indicando un aumento del riciclaggio delle particelle che può essere la causa dell'aumento di turbolenza misurato dal riflettometro.

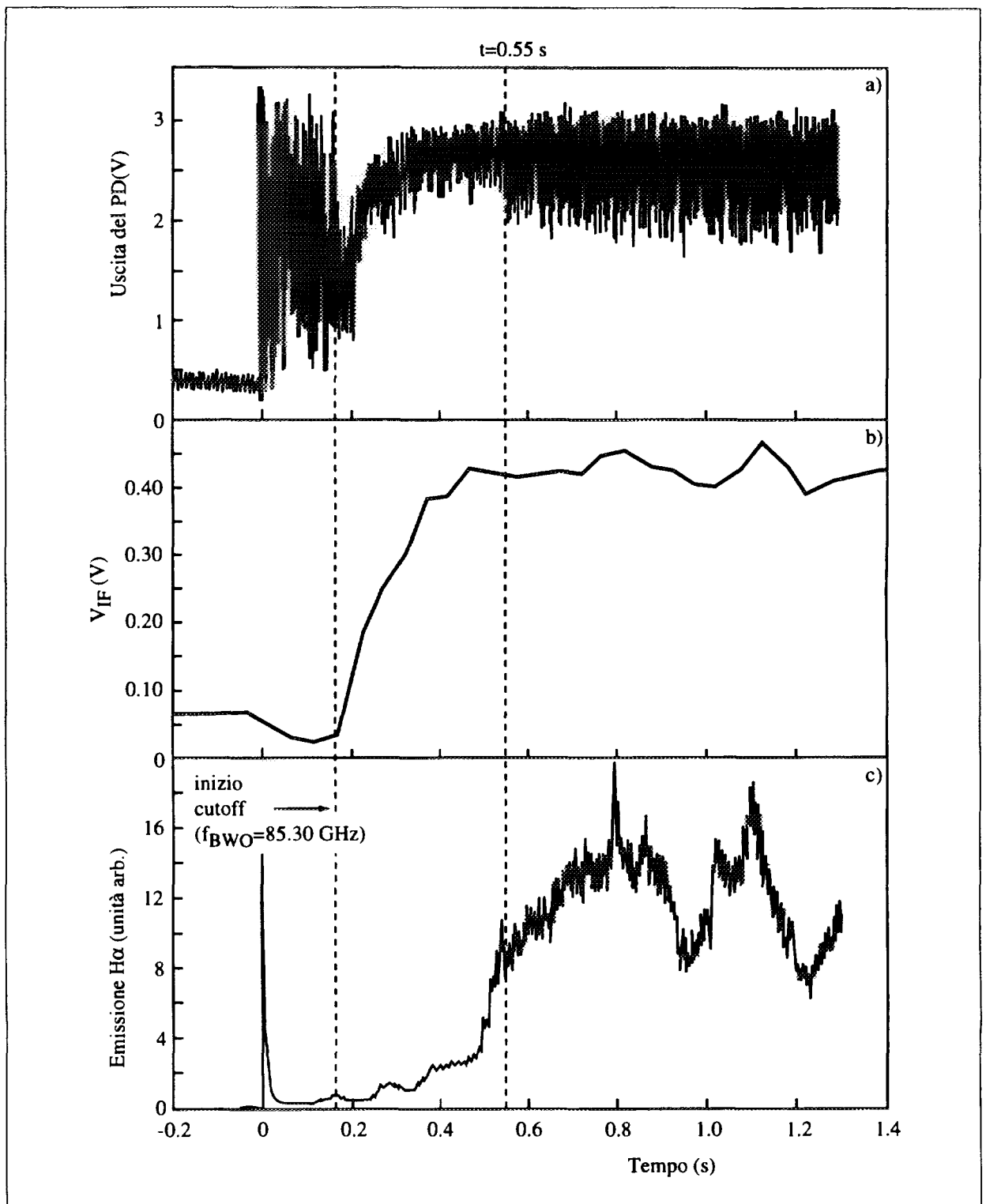


Fig. 13 - (a): Andamento temporale [23] della fase AM nella scarica #7997, con frequenza del BWO fissata. (b) Segnale di $H\alpha$. Si osserva un aumento del livello delle fluttuazioni di fase e del valore del segnale di $H\alpha$ per $t > 0.55$ (#7997).

Misure a frequenza variabile e inversione del profilo di densita'

La figura 14 mostra i dati relativi ad una scansione in frequenza del riflettometro durante la scarica 8093; la frequenza varia sugli otto canali preselezionati ed i corrispondenti valori di fase misurati consentono di ricostruire la parte sondata del profilo di densità con otto punti. Di volta in volta si seleziona l'uscita di fase come spiegato nel capitolo 3. Assumendo un profilo di densità parabolico, é possibile semplificare le inversioni di Abel dell'equazione 1.6 effettuando il cambio di variabile [18]:

$$\omega = \omega_p \text{ se } n\beta \quad (4.4)$$

ed ottenendo:

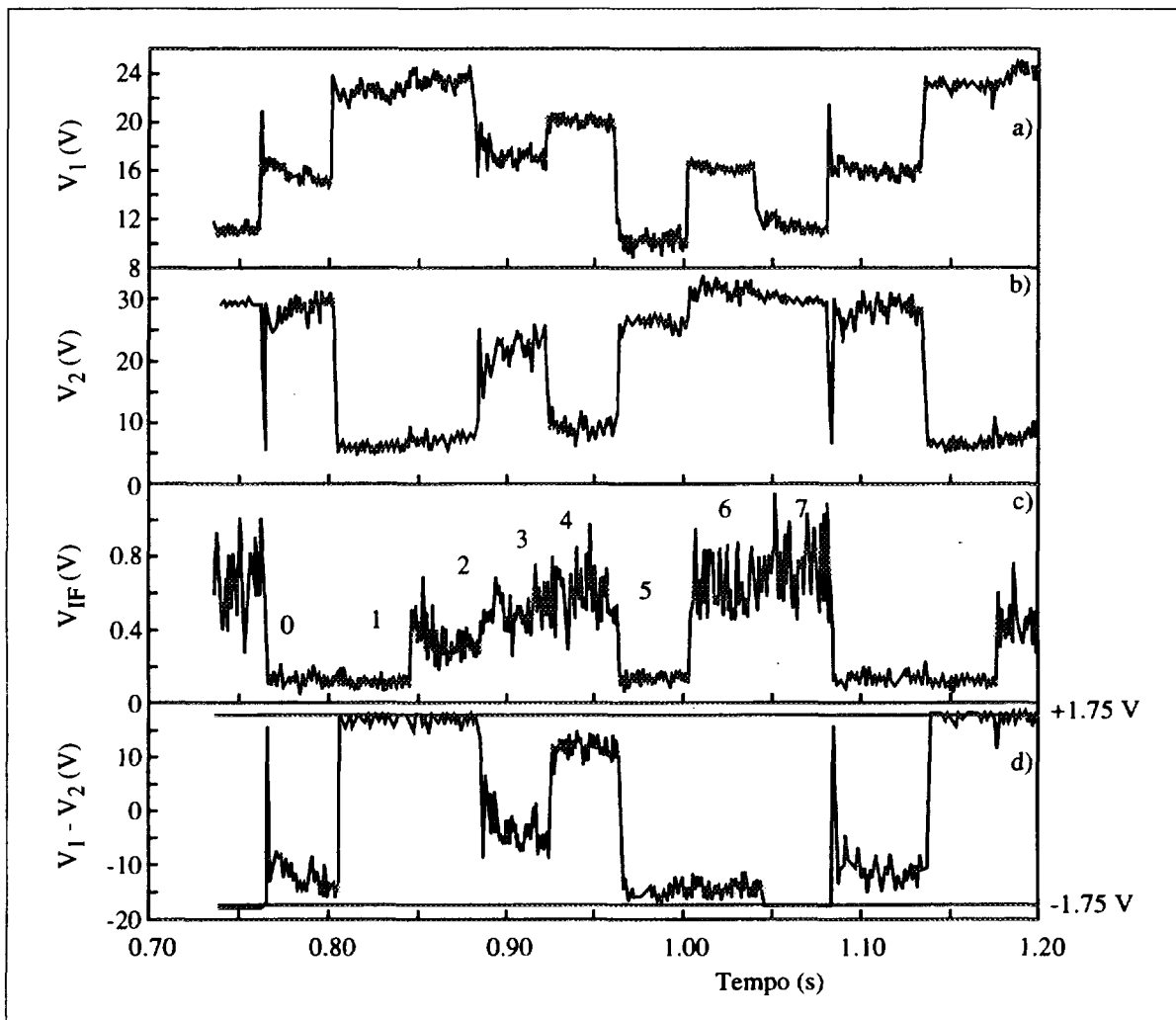


Fig. 14 - (a) Segnale di uscita del primo PD durante una scansione in frequenza della portante in una fase stazionaria della scarica #8093. (b) Stesso andamento per il secondo PD. (c) IF detector è indicato il numero del canale; (d) differenza tra i segnali dei due PD. Tutti i segnali sono mediati su un intervallo di 1 ms.

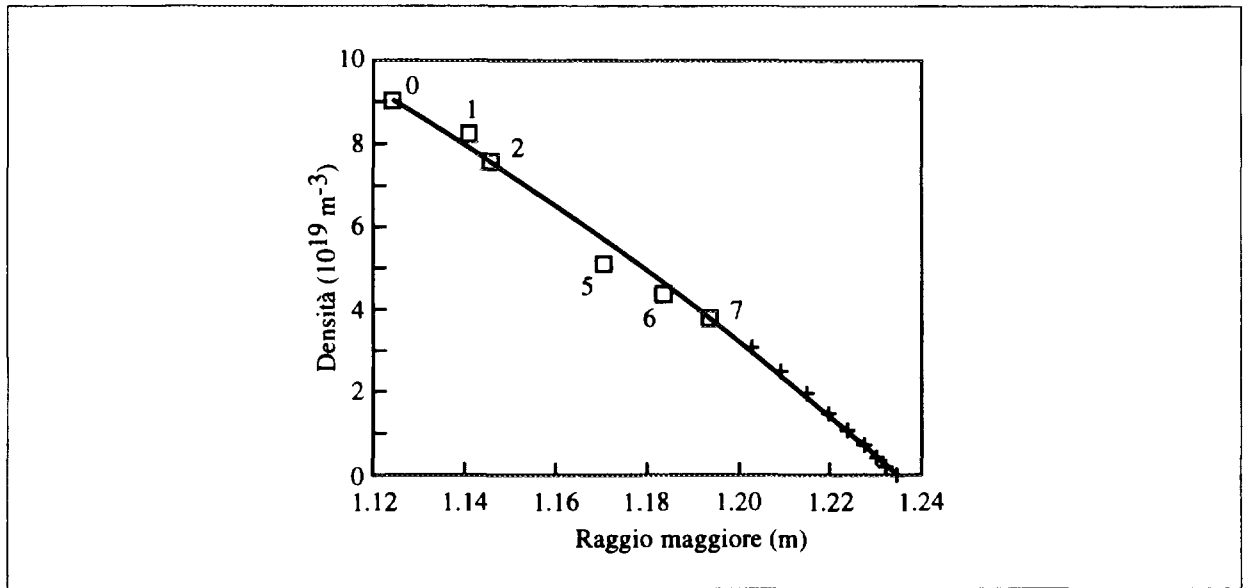


Fig. 15 - Profilo di densità ottenuto invertendo i dati di fig. 14. Linea continua: profilo di inizializzazione; croci: punti autoricostruiti per frequenze minori di quella sperimentale minima (55.5 GHz), quadrati: profilo ottenuto dall'inversione dei dati sperimentali sui canali indicati.

$$r_c = r_{ant} - I_1 - \frac{c}{\pi\Omega} \int_{\beta_1}^{\pi/2} \Phi(\omega_p \sin\beta) d\beta \quad (4.5)$$

dove I_1 rappresenta la parte di integrale relativa a frequenze non disponibili sperimentalmente, che deve essere determinato utilizzando i dati di altre diagnostiche.

Il profilo ottenuto inserendo in questa relazione i dati della figura 14 é mostrato in figura 15. I punti sperimentali sono soltanto sei perché i due canali 3 e 4 non fornivano una lettura di fase utilizzabile.

La parte di esterna del profilo, per la quale non sono disponibili punti sperimentali del riflettometro, é stata assunta parabolica e corrispondente ad un profilo di densità massima pari a quella misurata dall'interferometro DCN e densità nulla al limiter ($R=1.235$ m); la corrispondenza tra i punti auto-ricostruiti e questo profilo, verifica la correttezza degli algoritmi usati. Anche l'accordo tra la ricostruzione sperimentale e lo stesso profilo parabolico in questa stima é ottimo e conferma la validità delle misure. In successivi sviluppi del lavoro si utilizzerà, per l'inizializzazione, un profilo più vicino a quello reale (bordo e centro plasma in alcune scariche sono spostati rispetto ai valori nominali) utilizzando i profili di densità ottenuti dalle inversioni dei dati DCN con i codici di equilibrio [20].

6 - DISCUSSIONE E PROGRAMMI FUTURI

Il sistema riflettometrico AM realizzato per FTU, dopo l'accurata caratterizzazione in laboratorio ed i risultati ottenuti in circa tre mesi di misure su plasma, ha rivelato interessanti possibilità e sviluppi per l'applicazione sistematica come diagnostica di densità per FTU.

Gli sviluppi futuri della diagnostica comprenderanno l'analisi accurata delle possibilità di misura delle fluttuazioni di densità; in particolare su questo punto sarà necessario discriminare il rumore generato sulla fase AM da effetti di basso segnale, da quello effettivo legato alle turbolenze del plasma [21.22]. Questo potrà essere effettuato mediante misure di correlazione tra i due riflettometri, e tra il segnale di IF ed i segnali di fase.

La tecnica di filtraggio dei dati ed inversione di profilo verrà perfezionata con l'obbiettivo di ottenere sistematicamente profili di densità affidabili nella regione accessibile ai riflettometri.

Da un punto di vista tecnico, verrà modificato il sistema di controllo remoto per renderlo indipendente dall'interazione con il calcolatore durante la scarica di FTU. A tal fine è già stato realizzato e collaudato un secondo tipo di porta di controllo che sostituirà l' S_PORT.

Verrà infine montata una terza coppia di antenne, orientate in modo da effettuare misure nel modo straordinario; utilizzando la risonanza inferiore, si avrà così la possibilità di sondare la parte centrale del profilo anche nel caso di densità elevate.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare tutto il gruppo FTU. In particolare A.Barone, B. Conti ed E. Grilli per il supporto tecnico. Si ringrazia inoltre S. Lupini per i preziosi contributi sulla parte elettronica, G. Buceti per le utili discussioni sul sistema di acquisizione e controllo ed A. Perminov dello I.A.P. per la collaborazione nello sviluppo dei relativi programmi FORTRAN. Un ringraziamento particolare a D. Frigione per aver fornito elementi e valutazioni iniziali per la riflettometria su FTU ed a M. Grolli per le misure di densità con l'interferometro DCN.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Hecht, A. Zajac, 'Optics', Addison Wesley (1974), p 84.
- [2] I.H.Hutchinson "Principles of plasma diagnostics", Cambridge press (1987); cap. 4; p.124-127
- [3] W.L. Ginzburg,"Propagation of electromagnetic waves in plasmas.", ed. Sadowski, Gallik; Gordon and Breach Inc. 1961, pag. 344.
- [4] E.T. Whittaker, G.N. Watson, "Modern analysis", Cambridge press (1950); pag.229.
- [5] A.E. Costley, Proc. Course and Workshop Basic and advanced diagnostic techniques for fusion plasmas, EUR 10797 II , Varenna 1986 , pag 379
- [6] V.A. Vershkov, V.A. Zhuravlev, Sov.Phys.Tech.Phys. **32** (523), 1987
- [7] J. Sanchez, B.Branas, T. Estrada, E. De La Luna, V. Zhuravlev, Rev.Sci.Instrum **63**, 4654 (1992).
- [8] P. Buratti, M. Zerbini, Rev. Sci. Instrum. **66**, 409 (1995).
- [9] P. Amadeo, "Sviluppo di un riflettometro a modulazione di ampiezza per la diagnostica di densita` del plasma su FTU", tesi di laurea univ. di Roma "Tor Vergata", A.A. 1993/94.
- [10] S.F. Adam, "Microwave theory and applications", Hewlett Packard Comp. (1969). a) pag. 125-133; b) pag. 134-141
- [11] H. Taub, D.L. Schilling,"Principles of communication system." Mc Graw Hill; pag. 91-95
- [12] T. Koryu Ishii, "Practical microwave electron devices", Academic Press inc, pag. 193-211
- [13] E.L.Ginzton,"Microwave measurements.", Mc Graw Hill, pag. 368-369
- [14] H.A.Atwater,"Introduction to microwave theory.", Mc Graw Hill, pag. 48-70
- [15] W.L. Barrow, L.J. Chu, "Theory of electromagnetic horn", Proceedings of the IRE, january 1939, vol. 27 pag 51-64
- [16] Lawson, Uhlenbeck, " Thresold signals.", Mc Graw Hill (1950), pag. 3-13
- [17] R. V. Pound, "Microwave Mixers", Mc Graw Hill (1948). a) pag. 19-29; b) pag 26-28
- [18] J.L. Doane, E. Mazzucato, G.L.Schmidt, Rev.Sci.Instrum. **52** , 12, (1981)
- [19] G. Bardotti, G. Buceti, G.B. Righetti, "Data Acquisition Systems and Data Base for tokamak experiments: the FTU case", submitted to IEEE trans. Nucl. Science
- [20] F. Alladio, P.Micozzi, Nucl. Fusion, **35** (1995) 305
- [21] J. Sanchez, et al. Rev.Sci.Instrum, **66**, (403) 1995
- [22] V.A.Vershkov,"Proposal of reflectometry system for Iter from T- 10 group.", Progress meeteng on microwave diagnostics ITER San Diego JWS, January 1995.
- [23] P. Amadeo, P. Buratti, M. Zerbini, "First Results in Amplitude modulation reflectometry on FTU Tokamak", poster presented at the 36th APS Plasma Physics Meeteng, Minneapolis (1994)

**Edito dall'Enea
Funzione Centrale Relazioni Esterne
V. le Regina Margherita, 125 - 00198 Roma
Finito di stampare nel mese di dicembre 1995
presso il laboratorio Tecnografico**