

Lecture

IL RADIOTELESCOPIO « CROCE DEL NORD »

A. FICARRA, E. GANDOLFI, F. PERUGINI
Laboratorio di Radioastronomia del CNR, Bologna

1. Introduzione

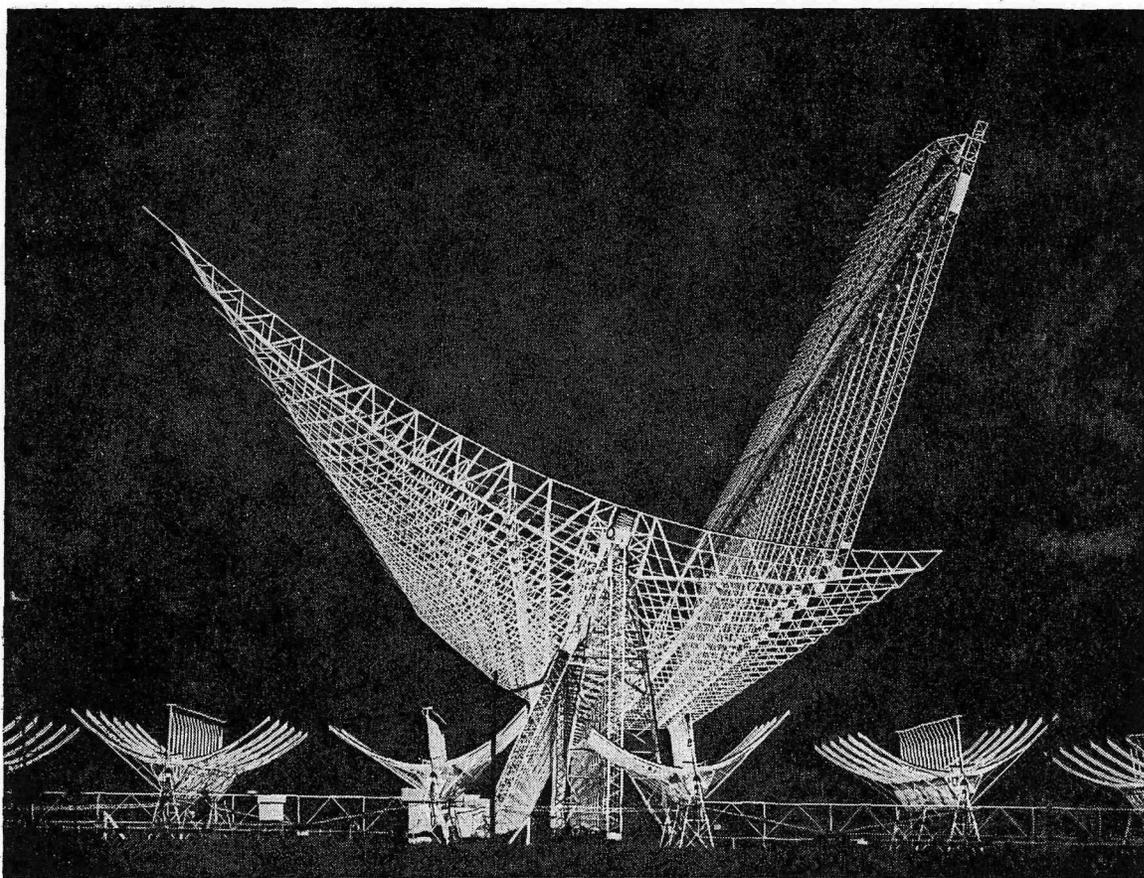
Il radiotelescopio « Croce del Nord » è situato in una tranquilla pianura a pochi chilometri da Medicina (BO); la sua costruzione è iniziata nel 1960 ed è terminata nel 1967 pur senza completare il preliminare progetto costruttivo.

Dopo 4 anni di intenso lavoro la sensibilità del radiotelescopio mostrava notevoli diminuzioni nei periodi di alta umidità atmosferica.

Gli agenti atmosferici ed i fertilizzanti chimici (fosfati) usati nella campagna circostante e portati dal vento sulle antenne avevano lentamente, ma con continuità, alterato le caratteristiche dei materiali e in special modo di quelli situati nella parte più critica: le linee di trasmissione realizzate con cave coassiali di alluminio aperte che, come verrà spiegato più oltre, costituiscono la prima parte del percorso del segnale alla base dei dipoli.

Tali componenti erano diventati particolarmente igroscopici e con caratteristiche elettriche notevolmente peggiorate. Questo motivo, unito alla possibilità di raddoppiare il potere risolutivo nella direzione Nord-Sud ed a quello di migliorare il metodo di acquisizione ed elaborazione dei dati adeguandolo all'evoluzione della tecnologia elettronica, ha spinto i ricercatori del Laboratorio di Radioastronomia di Bologna ad apportare delle sostanziali modifiche al progetto iniziale.

La data del mese di maggio 1976 ha segnato l'inizio di un nuovo ciclo di registrazioni. Questo articolo vuole essere una trattazione volutamente semplice dei principi fondamentali e delle tecniche che sono alla base della realizzazione e del funzionamento di questo radiotelescopio che è attualmente il più importante esistente in Italia.



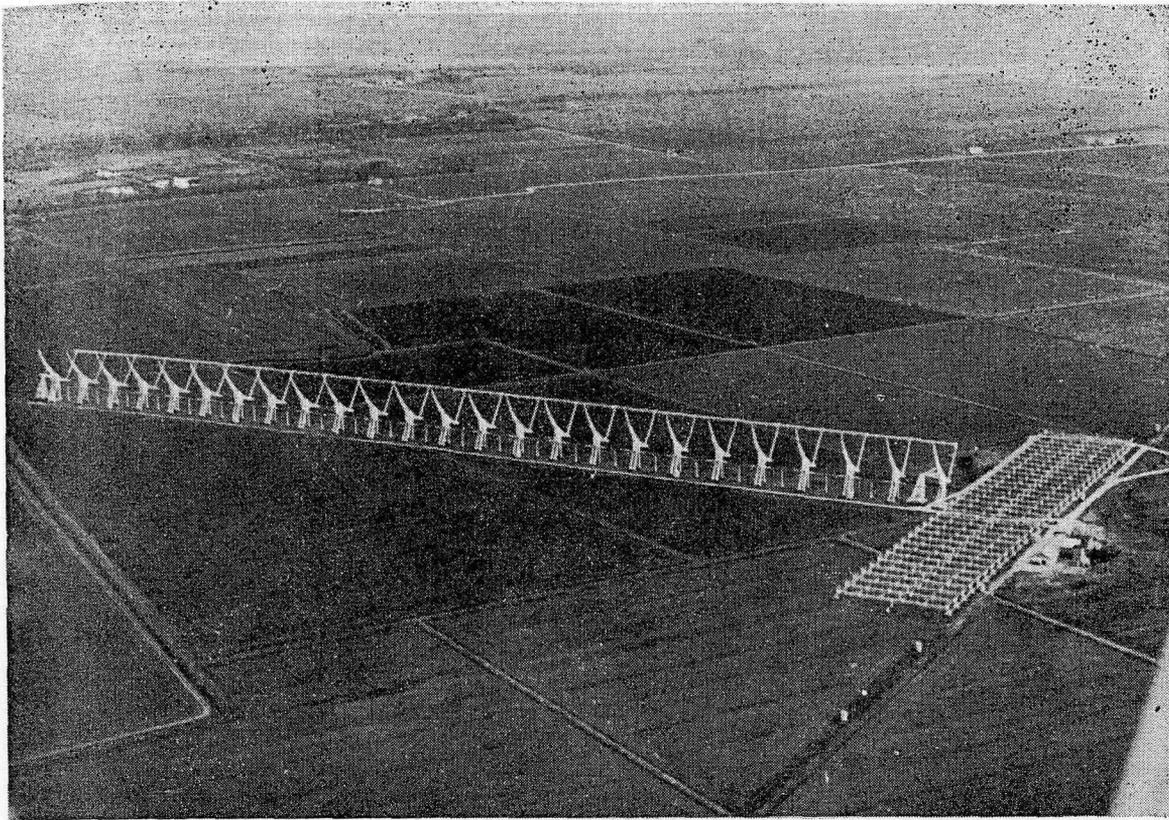
Vista aerea del radiotelescopio « Croce del Nord » nella versione iniziale terminata nel 1967: si può osservare la lunga antenna (560 m) del ramo E-W e le 32 antenne del ramo N-S.

2. Struttura meccanica

2a. Considerazioni generali

Il radiotelescopio Croce del Nord è stato costruito per ricevere le radiazioni elettromagnetiche comprese in un intervallo di frequenze di 2 MHz centrato sulla frequenza di 408 MHz pari alla lunghezza d'onda $L = 73,5$ cm. (fig. 1). È stato concepito come uno strumento di « transito », ossia capace di ricevere le radiazioni elettromagnetiche provenienti da un punto dello spazio quando questo, per effetto della rotazione terrestre, si trova sul meridiano celeste del luogo. Il sistema di movimento elettromeccanico del radiotelescopio prevede quindi solo il puntamento in declinazione (fig. 2).

Il radiotelescopio Croce del Nord è costituito da due serie di antenne disposte: una in direzione Est-Ovest (braccio E-W) ed una in direzione Nord-Sud (braccio N-S). Il braccio E-W è realizzato con una sola antenna con lo specchio di forma cilindro-parabolica lungo 560 m e largo 35 m. Lungo l'asse focale, parallelo all'asse di rotazione, e a distanza di circa 20 m da esso si trovano allineati ed egualmente spazati a distanza di 36 cm ($L/2$) 1536 dipoli che trasformano le onde radio,



Vista ravvicinata della parte centrale del radiotelescopio « Croce del Nord »: si può notare la diversità dello specchio dell'antenna del ramo E-W (un arco di parabola non contenente il vertice) rispetto allo specchio delle antenne del ramo N-S (arco di parabola contenente il vertice).

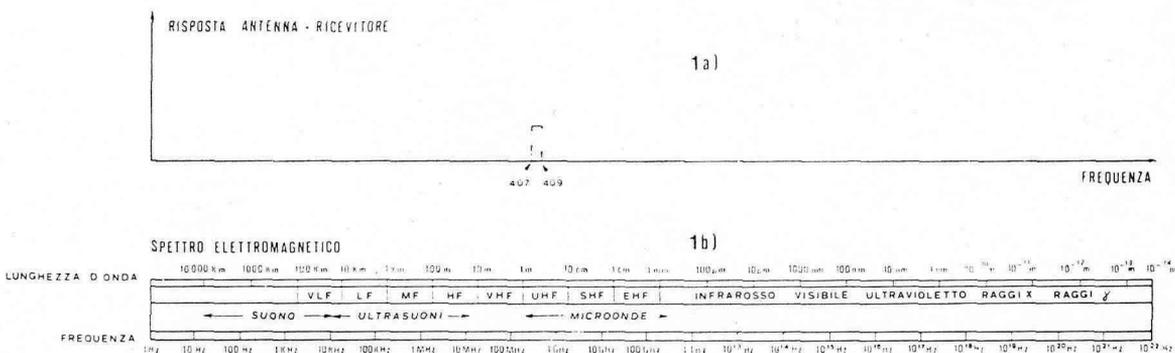
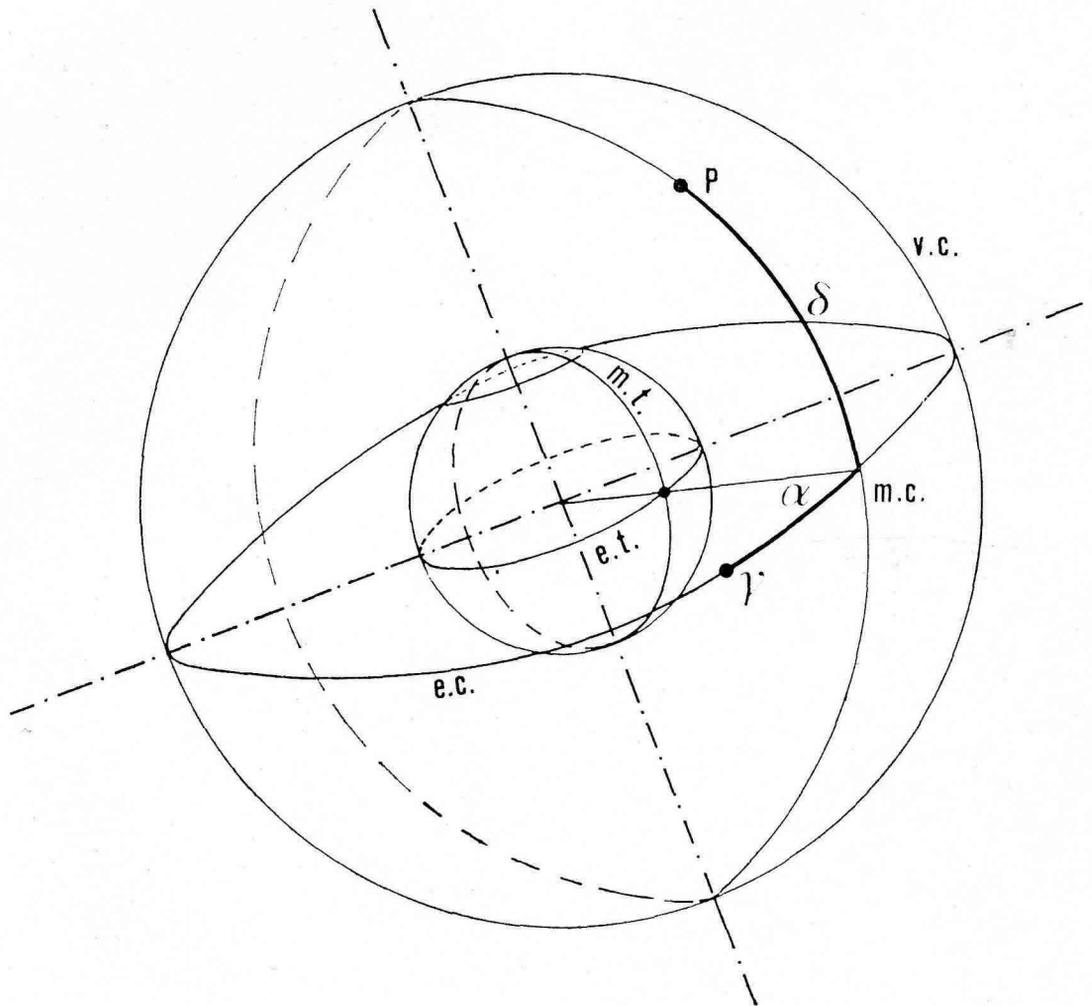


FIG. 1

La figura rappresenta in a) la risposta del sistema antenna + ricevitore del radiotelescopio « Croce del Nord »; in b) la suddivisione delle varie categorie di radiazioni elettromagnetiche in relazione alla lunghezza d'onda (e quindi alla frequenza). Sono riportate anche delle indicazioni relative allo spettro sonoro ed agli ultrasuoni benché siano di natura diversa. Per questi ha valore solo la corrispondenza con la frequenza.



- e.t. = equatore terrestre
- e.c. = equatore celeste
- m.t. = meridiano terrestre
- m.c. = meridiano celeste
- γ = punto vernale
- α = ascensione retta
- δ = declinazione

FIG. 2

Rappresentazione dei parametri fondamentali usati per determinare le coordinate astronomiche di un oggetto nel sistema equatoriale.

convogliate su di essi dallo specchio, in tensioni elettriche misurabili. Il braccio N-S è costituito da 64 antenne (anche queste di forma cilindro-parabolica) lunghe 23,5 m e larghe 8 m, disposte parallelamente a 10 m l'una dall'altra, come si vede dalla fig. 3.

La diversa struttura dei due bracci (una sola antenna per il braccio E-W e 64 antenne per il braccio N-S) è dovuta alla impossibilità di realizzare meccanicamente una struttura unica lunga 640 metri su un profilo parabolico con dipoli nel relativo fuoco e ruotabile attorno ad esso.

Sull'asse focale di ogni antenna, analogamente al braccio E-W, sono disposti a uguale distanza l'uno dall'altro 64 dipoli.

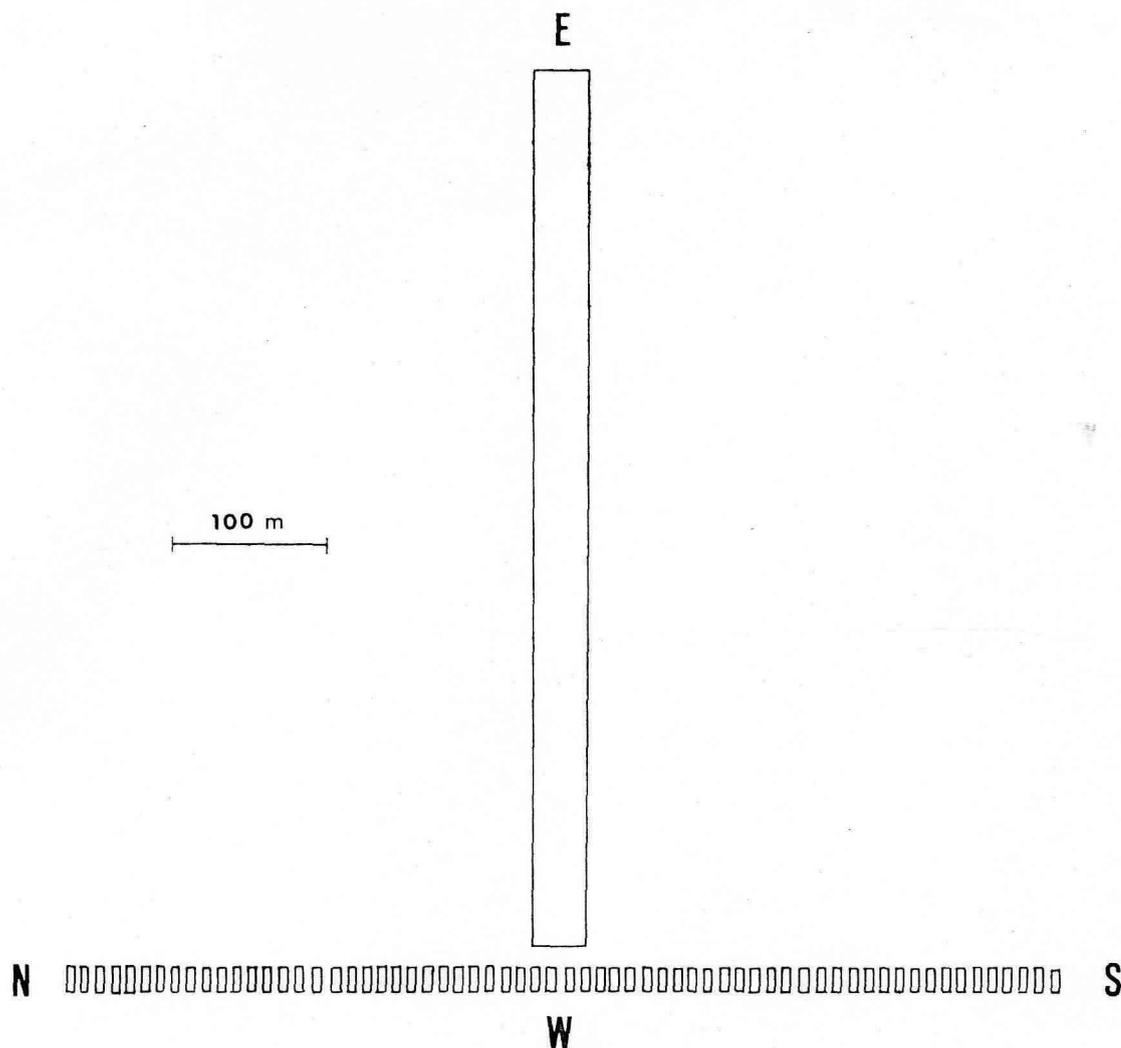


FIG. 3

Distribuzione schematica delle antenne del Radiotelescopio «Croce del Nord». I rettangoli rappresentano le superfici delle singole antenne, il disegno è approssimativamente in scala 1:5000.

2b. Lo specchio

La forma parabolica dello specchio, così diffusa in astronomia e in radio-astronomia dipende dalle note proprietà matematiche della parabola che permettono:

1) di convergere sul fuoco tutte le radiazioni provenienti da una direzione parallela all'asse della parabola.

2) di ottenere che tutti i punti di una superficie d'onda (punti in fase) provenienti da una direzione parallela all'asse della parabola si trovino ancora in fase nel fuoco.

La precisione meccanica della struttura non è da considerare in senso assoluto, ma relativamente alla lunghezza d'onda alla quale lo strumento è destinato a lavorare. Teoricamente si può prevedere che se la forma geometrica dello specchio non differisce da quella di una parabola reale di più di $L/16$ (anche in relazione a modifiche che subisce la struttura a causa di agenti atmosferici: vento, temperatura...

e a causa di deformazioni meccaniche) si può ritenere che tali imperfezioni non influenzino sensibilmente (meno dell'1%) il rendimento dello strumento. Tale proprietà ha permesso di limitare gli sforzi tendenti ad ottenere una struttura particolarmente precisa ed inoltre, considerando che la lunghezza d'onda per cui è stato progettato è di 73,5 cm ($L/16 = 5$ cm), ha permesso di costruire lo specchio non completamente pieno (vantaggio notevole specie per quanto riguarda le sollecitazioni al vento, alla neve e all'acqua), ma con fili di acciaio posti alla distanza di 2 cm.

Per aumentare l'efficienza e abbassare il livello dei segnali spuri, in prossimità dei dipoli è stato disposto un ulteriore specchio a forma di angolo (corner); in questo modo il cammino delle radiazioni elettromagnetiche diventa quello indicato nella fig. 4b.

Dalle caratteristiche geometriche dell'antenna si può quindi ricavare quale è il potere risolutore del radiotelescopio, ovvero la capacità di vedere distinti due oggetti angularmente vicini.

Nel nostro caso il potere risolutore è di 4'-5' in direzione N-S e di 4' in direzione E-W. Ora in confronto ai telescopi ottici tale potere risolutore è ridicolo poiché corrisponderebbe a quello di un telescopio ottico di diametro 4 cm (una normale macchina fotografica).

Notevolmente più grande è invece la quantità di energia raccolta da tale strumento, poiché essa è proporzionale alla superficie di raccolta della radiazione elettromagnetica incidente, che è notevolmente più considerevole di un qualsiasi strumento ottico. Tale caratteristica permette di misurare e quindi individuare sorgenti estremamente deboli e, che può anche significare, oggetti estremamente lontani. Si può quindi affermare che il radiotelescopio Croce del Nord è particolarmente (ma non solo) adatto per ricerche su sorgenti extragalattiche.

3. L'antenna propriamente detta

La conversione dell'energia elettromagnetica, che lo specchio convoglia sul fuoco della parabola, in tensioni elettromagnetiche misurabili è ottenuta dai dipoli. Occorre ricordare che è la lunghezza del singolo dipolo (e poi tutto il resto sarà reso coerente con esso) che determina effettivamente la frequenza di lavoro del radiotelescopio, poiché lo specchio determina solo una frequenza massima di ricezione.

I dipoli uniformemente allineati sia sul braccio E-W che sul braccio N-S sono in sintesi dei ricevitori-convertitori elementari di energia, energia che occorrerà quindi portare nella stanza centrale di elaborazione dei dati seguendo le specifiche sotto riportate:

1) limitare il più possibile l'attenuazione del segnale rispetto al rumore cioè amplificare il segnale ricevuto fino a renderlo accettabile come « input » per l'elettronica costruita per la sua elaborazione, tutto questo cercando di rendere massimo il rapporto segnale rumore,

2) fare in modo che i punti in fase di una superficie d'onda si trovino ancora in fase, ma come tensione elettrica, all'ingresso della stanza di elaborazione, e in tutti i punti intermedi in cui vengono a sommarsi.

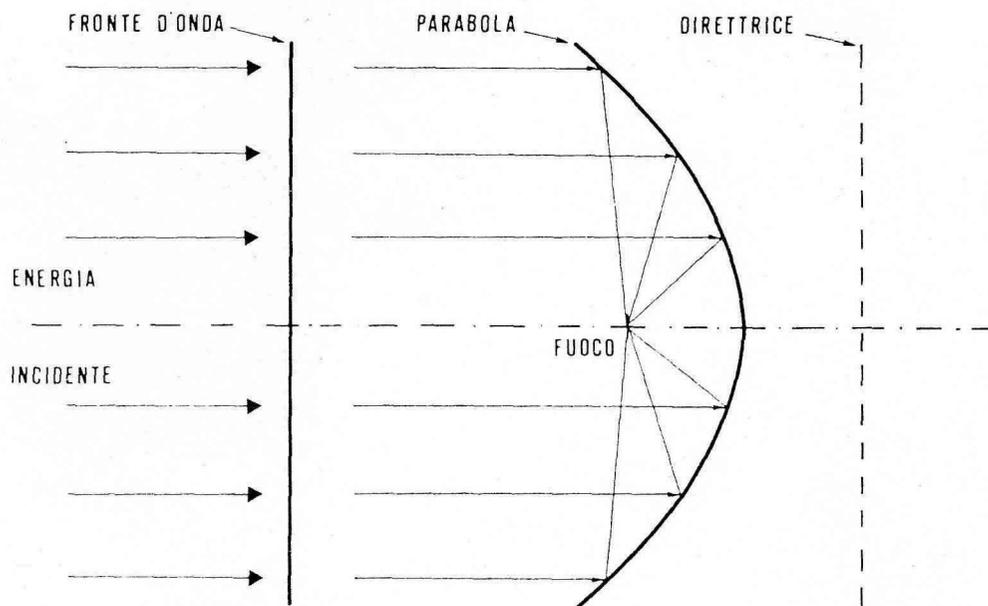


FIG. 4a

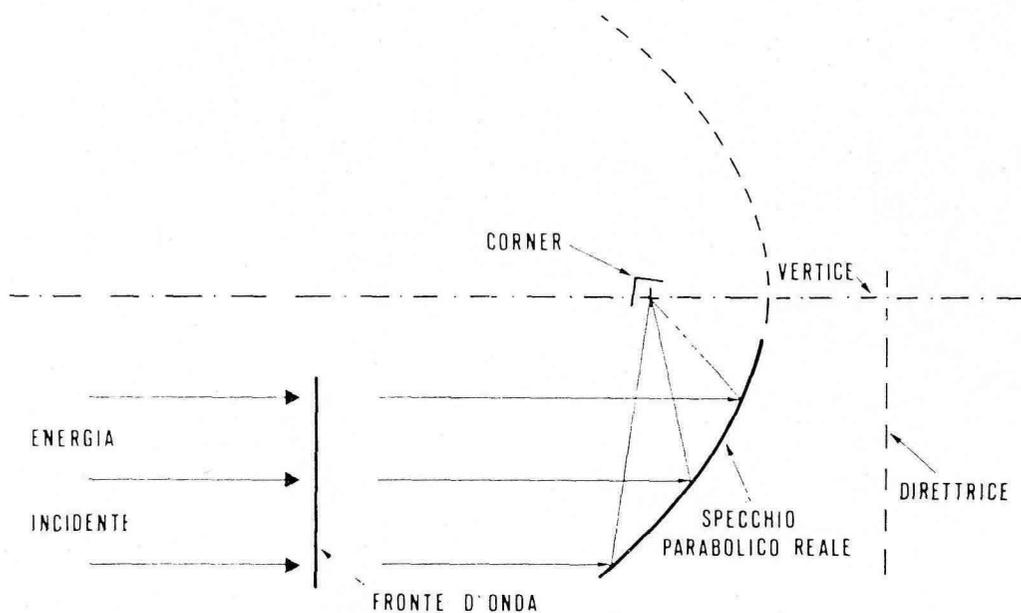


FIG. 4b

In a) sono evidenziati i parametri fondamentali e le proprietà della parabola; in b) è esemplificata la condizione reale che si verifica al radiotelescopio «Croce del Nord»: si noti il «corner» e come lo specchio nella sua realizzazione non occupi la parte di parabola che contiene il vertice per evitare di avere una zona di ombra dovuta ai dipoli situati nel fuoco.

3a. Braccio E-W

I 1536 dipoli del braccio E-W sono divisi in 6 sezioni di 256 dipoli ciascuna. All'interno di ciascuna sezione si opera una somma progressiva dei segnali raccolti

con un metodo detto ad «albero di Natale» che permette di passare da 256 segnali elementari ad un unico segnale mantenendo le specifiche citate prima (fig. 5a).

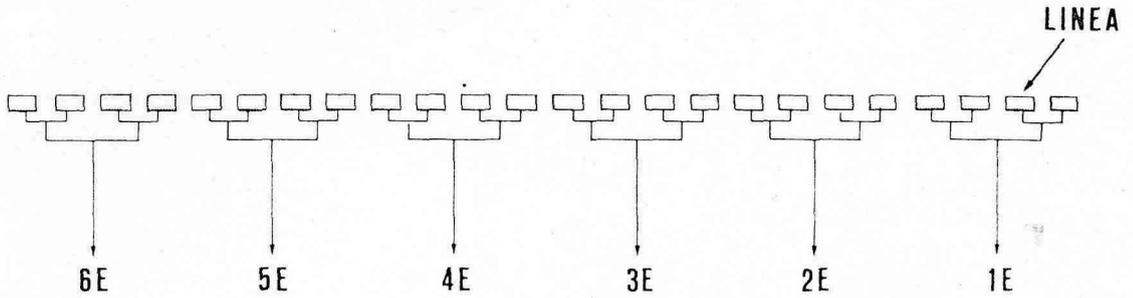
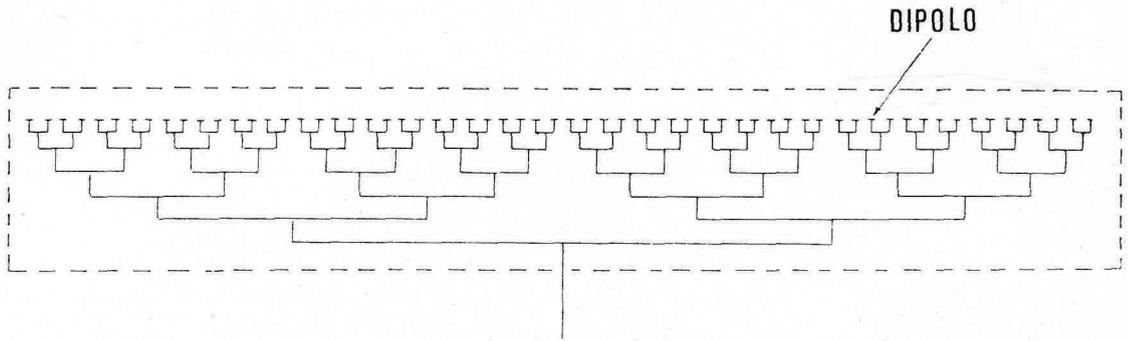


FIG. 5a



PARTICOLARE DELLA LINEA

FIG. 5b

Si può osservare il metodo utilizzato per convogliare l'energia elettromagnetica, convertita in tensioni elettriche dai dipoli, alle cabine situate alla base delle antenne. In a) è rappresentata la situazione complessiva del ramo E-W: con 1E ... 6E sono indicate le 6 cabine del ramo E-W; in b) è mostrato più in dettaglio ognuna delle linee contenuta interamente in un involucro di polietilene [e già evidenziata in a)]. In entrambi i casi è evidente la struttura dei collegamenti ad «albero di Natale».

All'interno di ogni sottosezione (fig. 5b) costituita da 64 dipoli il segnale elettrico si muove su di una linea coassiale in cava di alluminio mentre dalle sottosezioni fino alle cabine si muove su cavo coassiale flessibile. La prima parte è quella più critica in cui occorre mantenere possibilmente costanti le condizioni atmosferiche: in particolare l'umidità.

Per questo motivo sia i dipoli, sia il primo percorso in cava sono racchiusi in un involucro di polietilene ad alta densità, trasparente alla radiazione elettromagnetica, che viene riempito di gas inerte (azoto).

Il segnale radio a (408 ± 1) MHz viene convertito, appena giunto in cabina, a (30 ± 1) MHz per ridurre le perdite nel portare il segnale dalle cabine alla stazione di elaborazione. Infatti il trasporto di energia elettrica su cavo comporta delle perdite per effetto «pelle» proporzionali alla \sqrt{f} in questo modo si diminuiscono le perdite di un fattore $= \sqrt{408/30} = 3,3$.

I segnali a frequenza intermedia (30 MHz) giungono alla stazione di elaborazione tramite cavi coassiali interrati a circa 1,20 m di profondità, per sottrarli alle

variazioni termiche rapide (giornaliere), che altererebbero le delicate relazioni di fase e ampiezza fra i segnali provenienti dalle 6 cabine (6 canali). Le variazioni termiche lente (stagionali) non comportano cause di errore poiché vengono considerate nelle calibrazioni giornaliere.

3b. Braccio N-S

Anche le 64 antenne che costituiscono il braccio N-S sono divise in 8 sezioni che raggruppano ciascuna 8 antenne.

All'interno di ciascuna antenna si trovano 64 dipoli e, anche in questo caso, con lo stesso metodo detto ad « albero di Natale », ma in modo un po' meno rigoroso (fig. 6) scegliendo un compromesso fra una buona efficienza ed un disegno relativamente semplice dal punto di vista costruttivo, i segnali dai dipoli vengono successivamente sommati fino ad avere un singolo segnale per ogni antenna.

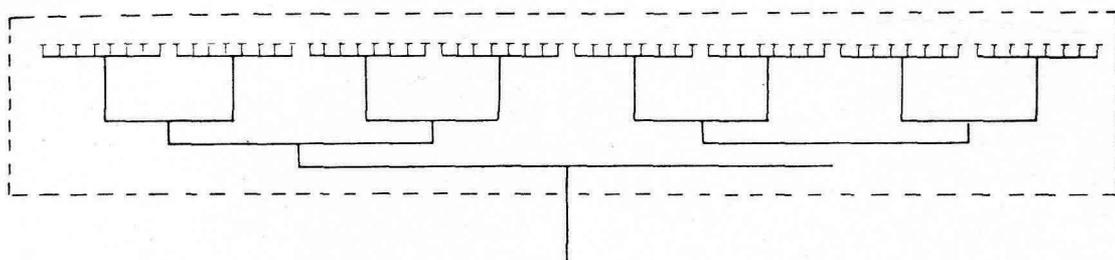


FIG. 6

La figura mostra una linea del ramo N-S equivalente a quella mostrata in Figura 5b per il ramo E-W. Si può notare come per il ramo N-S i dipoli vengano prima sommati a gruppi di 8 prima di procedere con il metodo ad « albero di Natale ».

A questo punto la situazione è diversa: esaminiamo cosa accade osservando le fig. 7a,b,c. Nel caso di fig. 7a, i punti equifase (P_1, \dots, P_8) di una superficie d'onda elettromagnetica arrivano in fase alle singole antenne, poiché i cammini (L_1, \dots, L_8) sono tutti uguali.

Nei casi di fig. 7b e 7c i punti equifase (P_1, \dots, P_8) non arrivano in fase sulle singole antenne poiché sono diversi i percorsi in aria (L_1, \dots, L_8); si noti inoltre che tali percorsi variano con il puntamento.

Occorre quindi adottare un sistema di ritardi, variabili col puntamento, per rimettere in fase i segnali provenienti dalle singole antenne prima di sommarli al fine di ottenere un solo segnale per ogni sezione N-S. Tale sistema verrà descritto in apposita appendice.

Appena il segnale a 408 MHz entra in cabina, viene convertito alla frequenza di 50 MHz analogamente a quello che accade per il braccio E-W e, tramite cavi coassiali, viene portato nella stanza centrale di elaborazione.

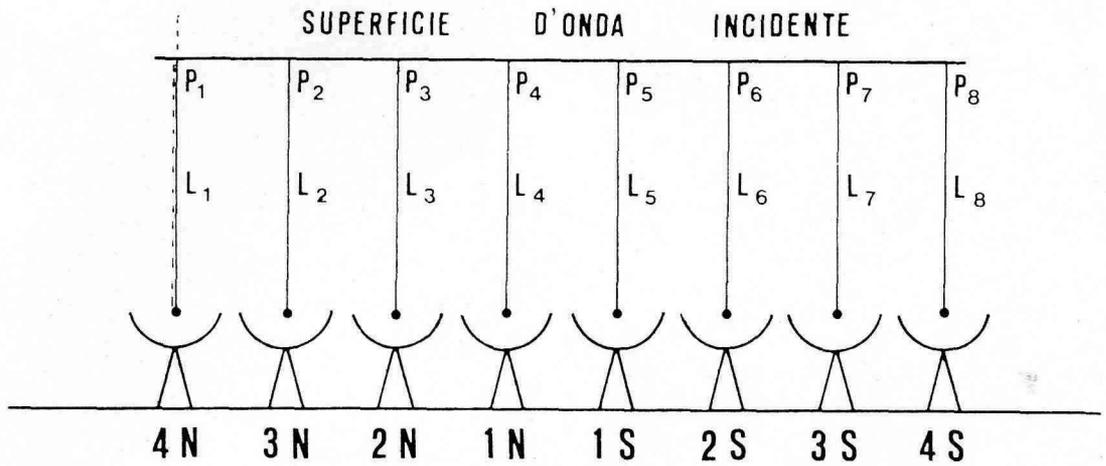


FIG. 7a

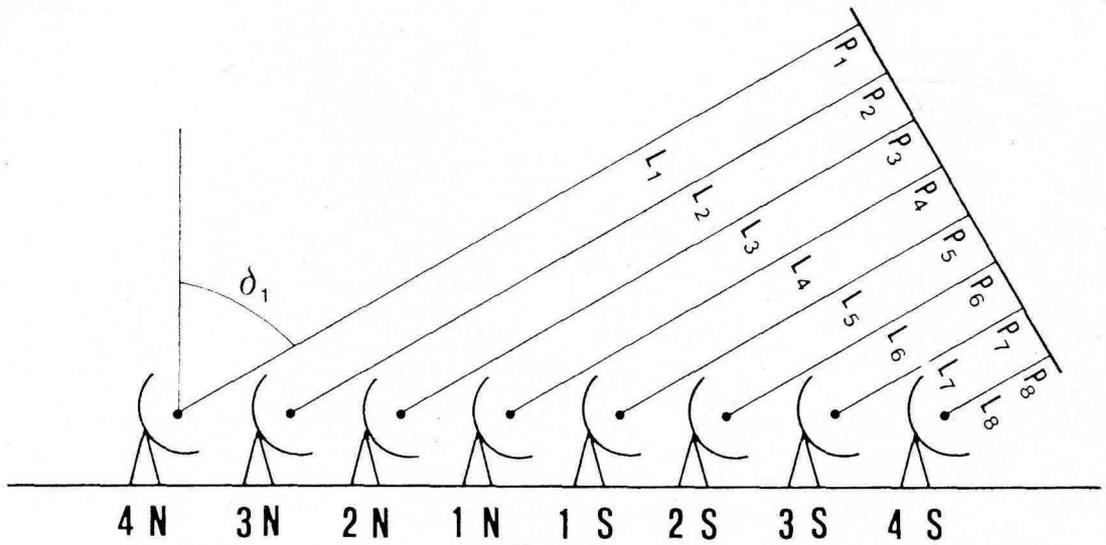


FIG. 7b

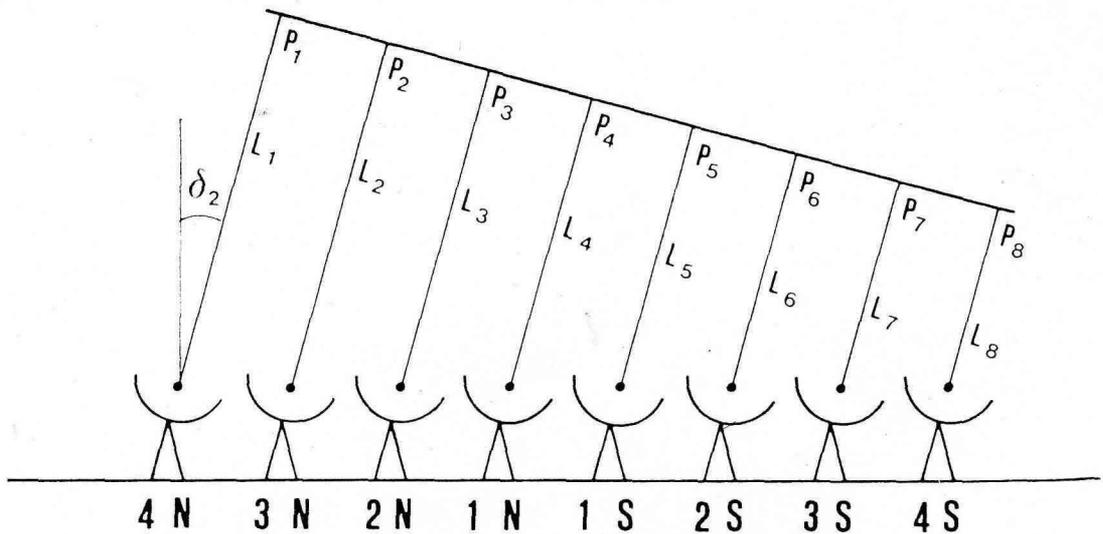


FIG. 7c

Vengono mostrate le posizioni relative fra le singole antenne di una qualunque sezione del ramo N-S ed un fronte d'onda elettromagnetica in ricezione, in condizioni di diverso puntamento in a) puntamento allo zenit: il fronte arriva in fase su tutte le antenne in b) e c) puntamento a declinazioni δ_1 , δ_2 con conseguenti sfasamenti.

Ora i 14 segnali dovranno attraversare opportune linee di ritardo tali da equalizzare i percorsi diversi fra le 14 cabine situate ai piedi delle antenne e la stanza di elaborazione.

A questo punto tutto quello che abbiamo realizzato è di convertire in tensioni elettriche misurabili l'energia elettromagnetica di una zona di cielo e concentrarla in 14 segnali distinti ai terminali di 14 cavi dentro una stanza. Vedremo ora in che modo si possono utilizzare questi 6 x 8 canali indipendenti (fig. 8).

3c. Costruzione dei 3 fasci E-W (A, B, C) e dei 5 fasci N-S (F, G, H, I, J)

Se sommiamo in fase i segnali provenienti dalle 6 sezioni del braccio E-W abbiamo quello che viene chiamato « fascio B » (fig. 9).

Se ritardiamo progressivamente i segnali elettrici che arrivano alle 6 sezioni del braccio E-W, quando li andiamo a sommare, in realtà, è come se sommassimo segnali provenienti da punti in fase su di una superficie d'onda che non ha la direzione del meridiano, ma è spostata; se lo spostamento è in anticipo abbiamo il « fascio A ».

Se noi ritardiamo ancora progressivamente, ma in senso opposto, abbiamo un segnale che proviene da una direzione spostata rispetto al meridiano ma in senso opposto, cioè in ritardo: « fascio C ».

Cosicché, con un semplice artificio di natura elettrica, è come se noi avessimo, invece di una sola antenna puntata nella direzione del meridiano, tre antenne puntate in direzioni progressive.

Poiché lo strumento è uno strumento di transito, ossia riceve le radiazioni solo quando la sorgente, per effetto della rotazione terrestre si trova nella direzione di puntamento (ascensione retta, angolo orario) del radiotelescopio, avremo che la sorgente verrà rilevata prima sul fascio A, poi sul fascio B ed in fine sul fascio C. Un eventuale disturbo generato in prossimità del radiotelescopio (cioè di origine terrestre) entrerà contemporaneamente nei 3 fasci (fig. 10). Con questo metodo si può avere oltre a 3 misure per ogni radiosorgente, anche un primo criterio per separare radiosorgenti da disturbi.

Analogamente si può operare con i segnali che arrivano dalle 8 sezioni N-S e si ottengono 5 fasci puntati elettricamente in 5 direzioni progressivamente spostate da Nord verso Sud, ma tutte alla stessa ascensione retta (fig. 11) quella del meridiano. In questo caso l'artificio permette di esplorare contemporaneamente una zona più estesa di cielo durante una stessa registrazione.

4. Metodi di lavoro ed interpretazione dei dati

4a. Principi di fisica generale

Per comprendere meglio le tecniche di elaborazione elettronica dei segnali corrispondenti ai 6 canali E-W ed agli 8 canali N-S e per agevolare il profano nella

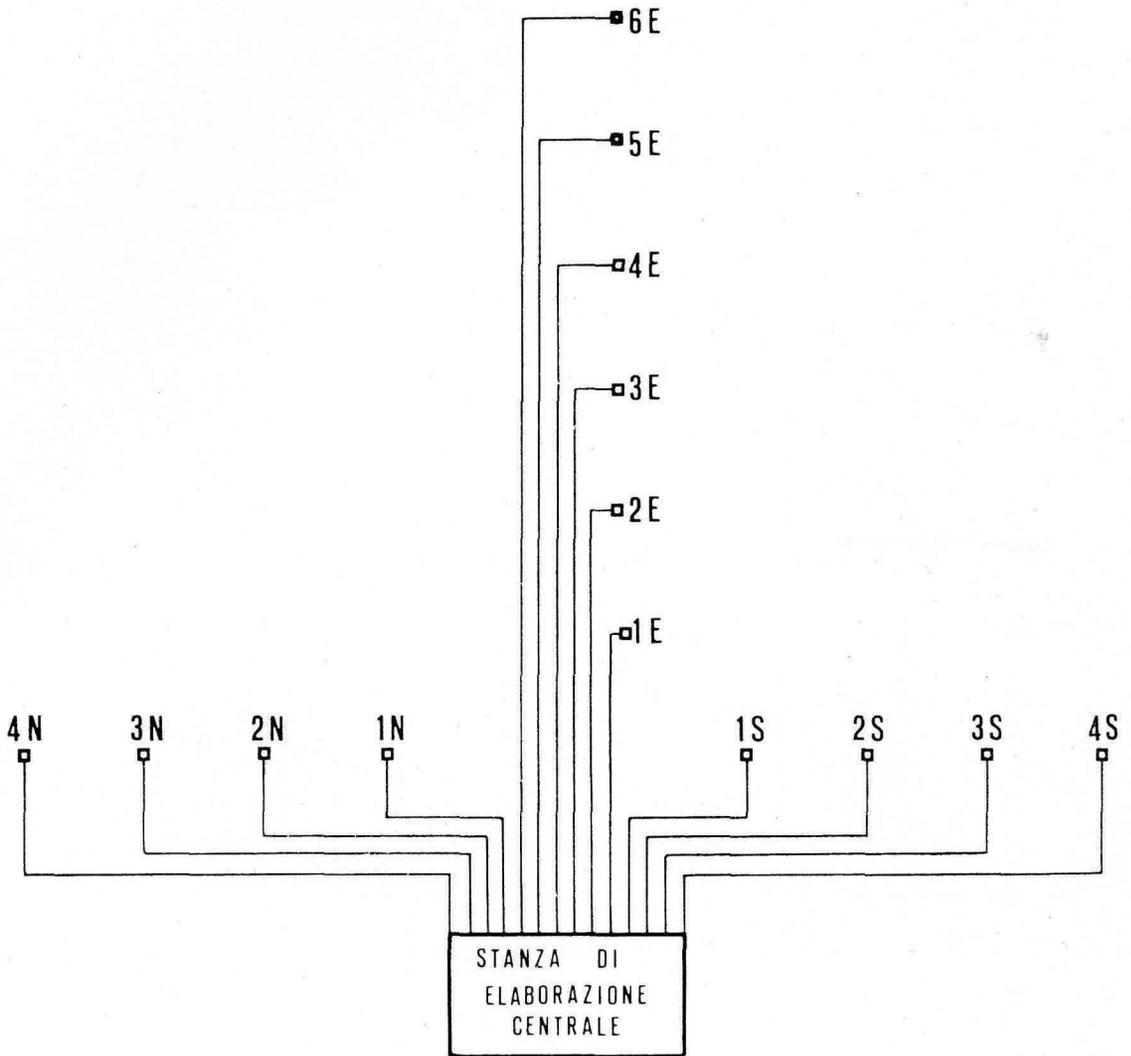


FIG. 8a

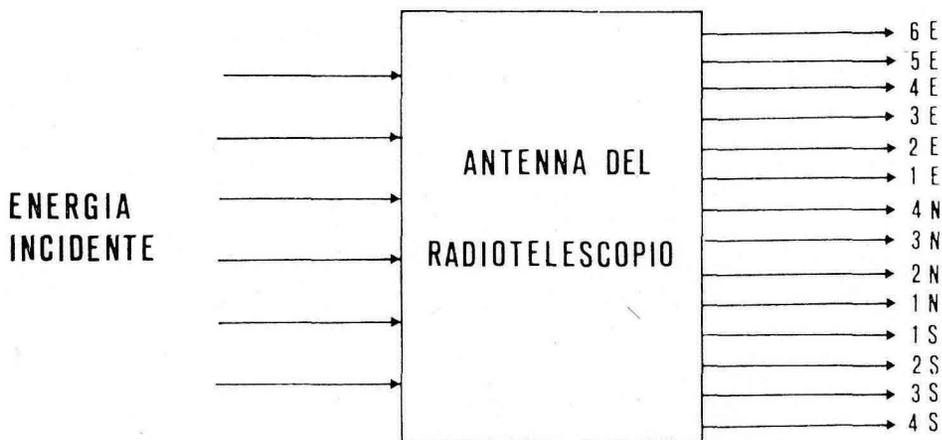


FIG. 8b

La figura mostra in a) la posizione delle 14 cabine di raccolta dell'energia elettromagnetica alla base delle antenne rispetto alla stanza di elaborazione centrale; in b) quale è il risultato complessivo della parte antennistica: un trasduttore gigante che converte energia elettromagnetica a 408 MHz in 14 tensioni variabili a 30 MHz.

comprensione dei conseguenti dati in uscita dal radiotelescopio richiamiamo alcuni principi di fisica generale.

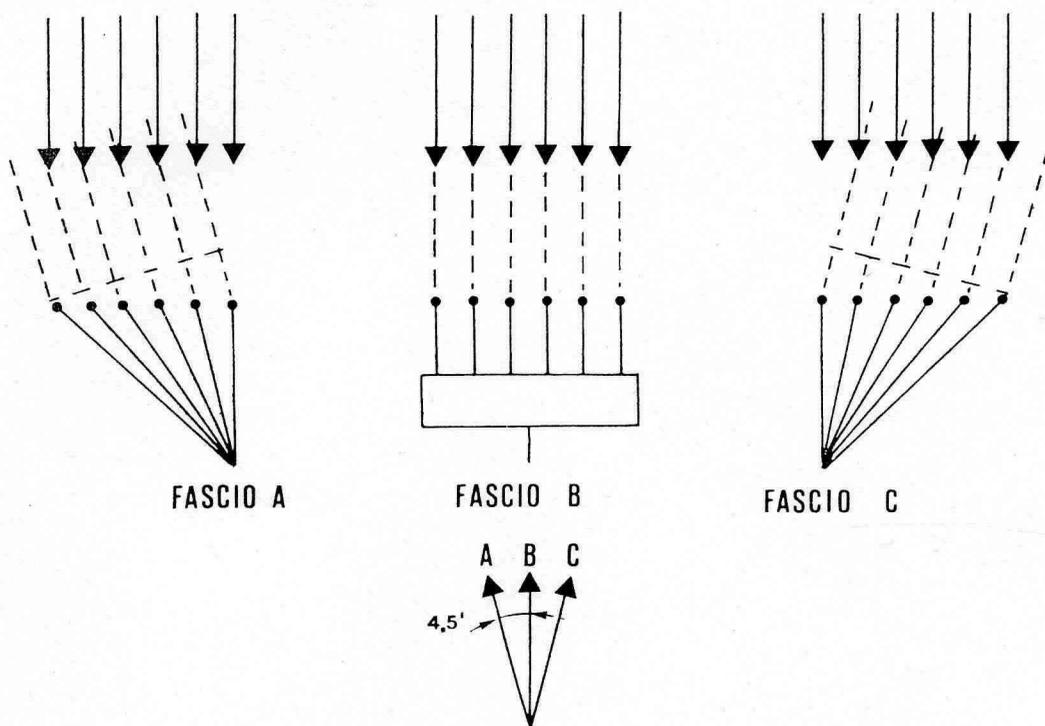


FIG. 9

Schema di principio delle realizzazioni dei fasci A, B, C del ramo E-W.

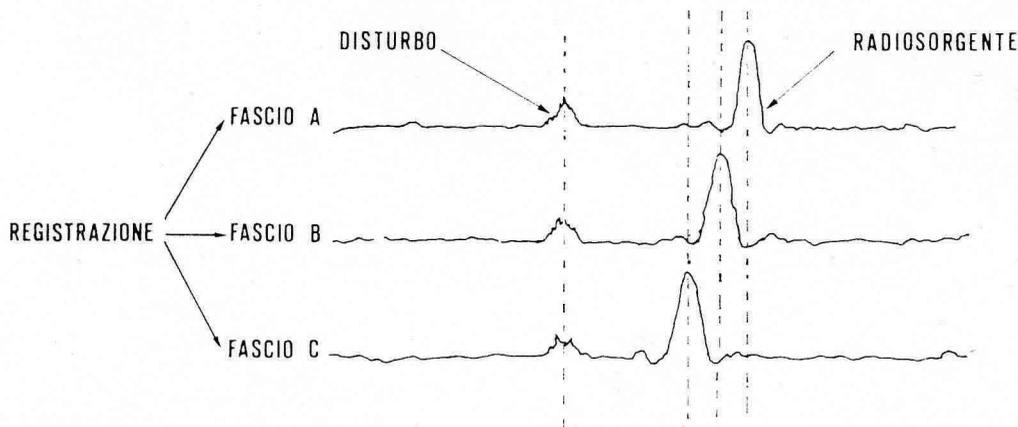


FIG. 10

Esempio del differente modo in cui viene ricevuta una radiosorgente o un disturbo dai diversi « fasci ».

La teoria ondulatoria della luce ci ricorda che due sorgenti luminose puntiformi e coerenti poste ad una distanza $d = kl$, generano una figura di interferenza su di uno schermo posto ad una distanza D come indicato in fig. 12. Una sorgente

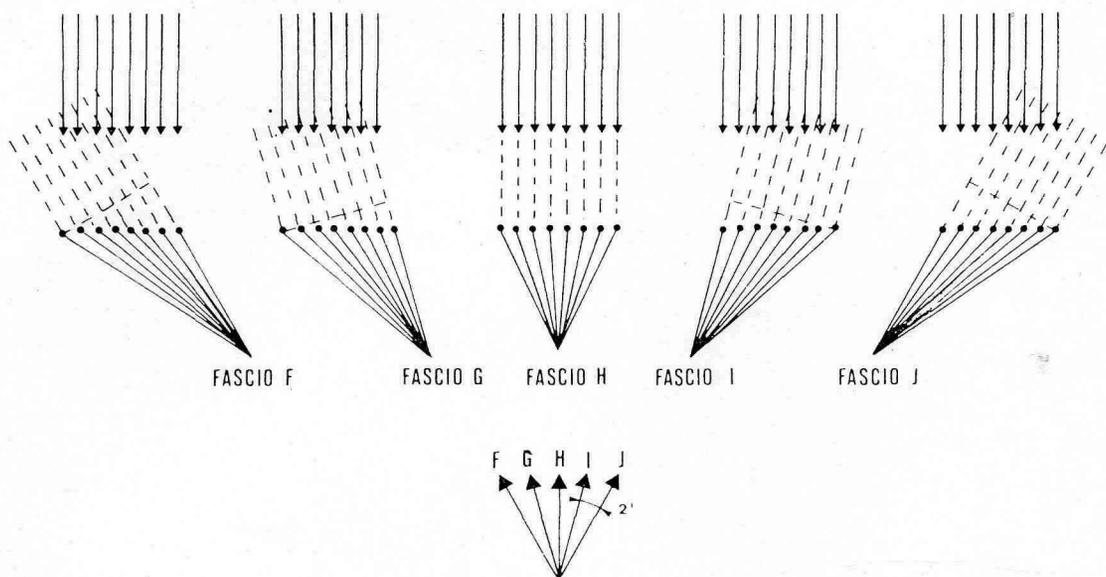


Fig. 11

Schema di principio della realizzazione dei fasci F, G, H, I, J, del ramo N-S.

estesa di dimensioni $a = n \lambda$ genera invece sullo stesso schermo una figura di diffrazione come in fig. 13.

Due sorgenti estese di dimensioni $a = n \lambda$ poste ad una distanza d generano una figura di interferenza analoga a quella di fig. 12, ma modulata in ampiezza dalla figura di diffrazione del tipo di fig. 13; ne esce quindi un grafico come riportato in fig. 14.

Ora le onde radio hanno la stessa natura elettromagnetica della luce (cambia solo la lunghezza d'onda e la frequenza) per cui i fenomeni saranno analoghi. Ne segue che un'antenna lunga $L = N \lambda$ emetterà (se alimentata con una certa potenza) una radiazione che, se la andiamo a misurare su uno schermo posto ad una distanza D , riproduce una figura identica alla fig. 13. Cioè come in fig. 15a. Nel caso delle onde radio e quindi delle antenne tale diagramma costituisce il diagramma direzionale d'antenna e viene di solito disegnato come in fig. 15b. Dove il lobo principale non è altro che il primo massimo della figura di diffrazione, ed i lobi laterali sono gli altri massimi.

Se ora consideriamo l'antenna in fase ricevente, anziché in trasmissione, abbiamo una completa simmetria di risultati.

Cioè se facciamo passare davanti ad una antenna una sorgente di onde radio di intensità costante (per esempio una radiosorgente) la risposta dell'antenna varierà descrivendo una curva (se viene riportata su carta) analoga a quella di fig. 15a. La prima domanda che una persona si pone osservando il grafico è: come mai anche se la sorgente è puntiforme la risposta non è limitata solo al momento in cui essa si trova esattamente nella direzione del puntamento? Questa apparente contraddizione è facilmente risolvibile se si considera che l'antenna, proprio in seguito alle proprietà ondulatorie della radiazione, ha una sensibilità diversa da zero anche al di fuori della direzione di puntamento.

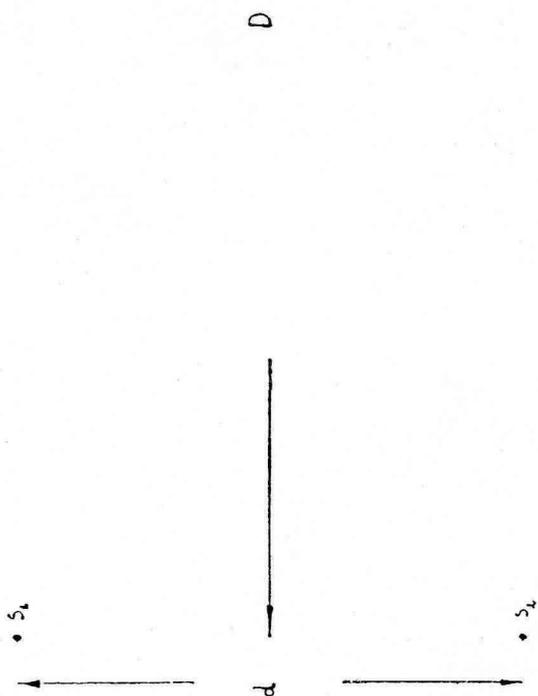
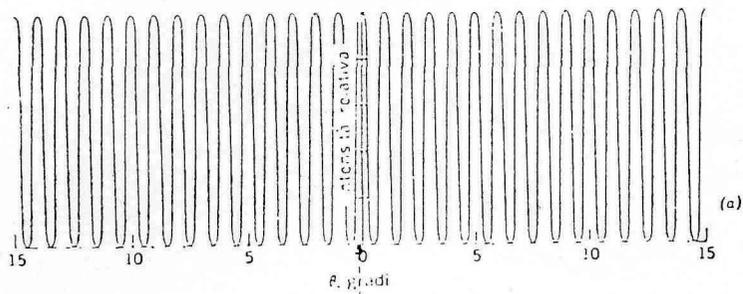
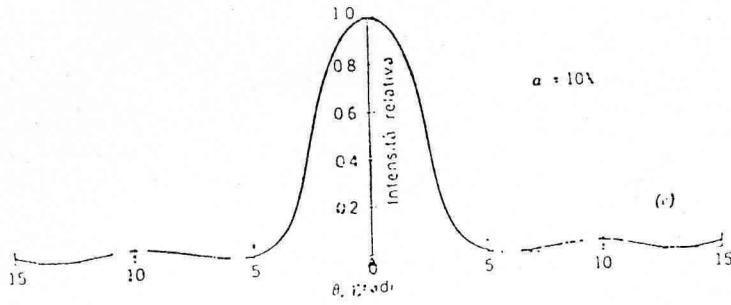


Fig. 12

Figura di interferenza generata su uno schermo da due sorgenti puntiformi e coerenti. La funzione dipende dalla distanza d delle sorgenti secondo la relazione $I_o = I_m \cos^2 \beta$, $\beta = (\pi d/\lambda) \sin \theta$.



D

FIG. 13

Figura di diffrazione generata da una sorgente estesa. La funzione relativa all'intensità dipende dalla lunghezza della sorgente secondo la relazione $I_0 = I_m (\text{sen } \alpha / \alpha)^2$, $\alpha = (\pi a / \lambda) \text{sen } \Theta$.

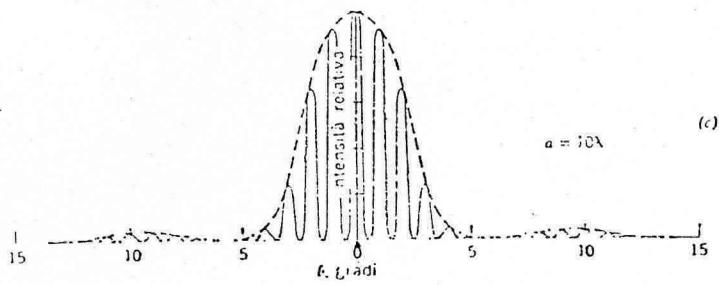
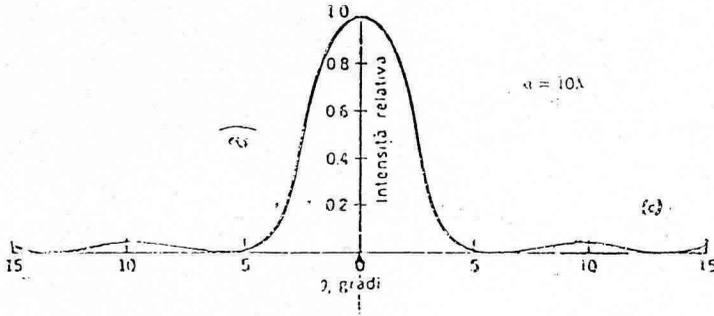


Fig. 14

Due sorgenti estese (dimensioni a) poste ad una certa distanza d danno luogo ad una distribuzione di energia che equivale ad una figura di interferenza (fig. 12) modulata da una figura di diffrazione (fig. 13). La relazione è la seguente: $I_0 = I_m + \cos^2 \beta (\text{sen } \alpha / \alpha)^2$.



D



Fig. 15

Il grafico mostra quello che accade per una antenna di dimensioni $d = k\lambda$ e è evidente: in a) come sia esattamente uguale a quello che accade per i fenomeni ottici (fig. 13); in b) come viene di solito rappresentato il fenomeno della diffrazione per le antenne in termini di diagrammi direzionali, per comodità di disegno esso non è esattamente in scala in quanto il lobo secondario dovrebbe essere a 10° dalla direzione del lobo principale.

Si può inoltre precisare che la curva che si ottiene con il procedimento indicato sopra, riproduce proprio l'andamento della sensibilità dell'antenna nelle varie direzioni relative a quella di puntamento. Nel caso reale del radiotelescopio è la stessa rotazione della Terra che fornisce automaticamente il movimento della radiosorgente rispetto all'antenna. Questo concetto, che viene realizzato nella pratica con la tecnica « total power » (vedi pag. 125), evidenzia immediatamente come la registrazione di una radiosorgente puntiforme abbia un profilo del tipo di fig. 13. Se invece noi prendiamo due antenne lunghe $L = n \lambda$ poste ad una distanza $d = k \lambda$, avremo riprodotto una configurazione analoga a quella ottica di fig. 14 con due sorgenti estese che interferiscono. Ne segue che, se noi usiamo il nostro apparato in ricezione sommando i segnali che le due antenne ricevono al passare di una radiosorgente e riportiamo su carta tali valori, avremo una curva analoga a quella di fig. 14. Il radiotelescopio Croce del Nord è stato progettato essenzialmente per lavorare facendo l'interferenza fra il segnale che arriva sul ramo E-W ed il segnale che arriva sul ramo N-S.

Il modo di combinare i segnali non consiste nel sommarli, ma nel farne il prodotto: questa tecnica non altera sostanzialmente il principio fisico che è alla base dell'interferometria ma rende più semplice la riduzione dei dati ottenuti. Questo metodo viene propriamente indicato come correlazione prodotto e sarà definita più precisamente nel par. 7.

4b. Realizzazioni pratiche

I due principi illustrati costituiscono due metodi di lavoro effettivamente utilizzati nel radiotelescopio Croce del Nord. Il primo viene normalmente chiamato total power ed i fasci A, B, C del ramo E-W ed i fasci F, G, H, I, J del ramo N-S ne sono l'attuazione pratica. (Si noti che si può realizzare anche il total power del segnale proveniente da una singola sezione sia del ramo N-S sia del ramo E-W). Il secondo è la correlazione che viene fatta contemporaneamente fra i 3 fasci del ramo E-W ed i 5 fasci del ramo N-S: dando come risultato 15 segnali correlati corrispondenti ad una stessa zona di cielo. L'elaborazione successiva di questi dati permette una ricostruzione dell'immagine radio della zona di cielo esplorata.

Nella fase di raddoppio ed ammodernamento del radiotelescopio un nuovo metodo di lavoro è stato affiancato agli altri che rimangono pure operanti; tale metodo viene detto degli « interferometri sciolti ».

Consiste nel correlare i 6 canali E-W con gli 8 canali N-S, questi dati opportunamente codificati (cioè viene integrato il segnale ricevuto per intervalli regolari di tempo e convertito in un numero proporzionale all'energia ricevuta nello stesso periodo) vengono inviati all'ingresso di un elaboratore elettronico « on line » con il radiotelescopio. La ricostruzione dell'immagine radio della zona di cielo esplorata verrà effettuata in un secondo momento operando sui valori numerici che nel frattempo l'elaboratore elettronico avrà trascritto su di un nastro magnetico.

Tale trattazione viene eseguita usando un elaboratore più potente sia per numero di memorie disponibili sia per velocità di esecuzione e possibilità di calcolo.

Utilizzando questa tecnica, diventa notevolmente più flessibile il modo di operare del radiotelescopio poiché si riesce a frazionare ulteriormente il numero di in-

formazioni che è possibile ricevere simultaneamente, sfruttando quindi integralmente l'informazione radio che lo strumento può fornire. L'inserimento dell'elaboratore elettronico permette inoltre la calibrazione continua in ampiezza e fase di ciascuna sezione dell'antenna e la correzione a posteriori di eventuali variazioni. Un altro vantaggio, tutt'altro che trascurabile che il nuovo sistema presenta rispetto all'uso dei fasci, consiste nella possibilità di filtrare separatamente il rumore di ciascuna risposta interferometrica, prima di sintetizzare il fascio d'antenna; questo a conti fatti porta ad un miglioramento del rapporto segnale rumore di circa un fattore 2.

5. La stanza centrale di elaborazione elettronica dei segnali provenienti dalle cabine E-W e N-S

L'assetto della stanza di elaborazione elettronica riflette la versatilità dello strumento a poter lavorare sia col metodo total power sia correlando i segnali analogici corrispondenti ai 3 fasci E-W con quelli corrispondenti ai 5 fasci N-S (multifascio) sia correlando i singoli segnali dei 6 canali E-W con i singoli segnali degli 8 canali N-S (interferometri sciolti).

La fig. 16a illustra i percorsi che fanno i segnali provenienti da due canali qualunque del ramo E-W e N-S. Si osservi che i percorsi sono quasi uguali differendo solo per il primo blocco logico che, come si può esaminare meglio osservando la fig. 16 contiene in più, per il ramo N-S, uno stadio di ritardi variabili.

Il segnale che esce dal primo divisore per due (fig. 17) viene utilizzato per fare misure di calibrazione di fase ed ampiezza dei singoli canali. Tali prove vengono normalmente fatte ogni giorno. Il primo sommatore è utilizzato per poter mandare nella stessa catena percorsa dal segnale radioastronomico un segnale campione generato da un'apposita apparecchiatura detta generatore di rumore. Questo segnale chiamato « marca interna », permette di risalire alla potenza della radiosorgente dal confronto fra le intensità relative.

Si può ancora osservare che i due divisori per otto hanno un numero di uscite superiore a quelle realmente utilizzate. Questo dipende semplicemente dalla maggiore facilità nel realizzare divisori in moduli standard o per 2 o per 8 piuttosto che per le diverse reali esigenze.

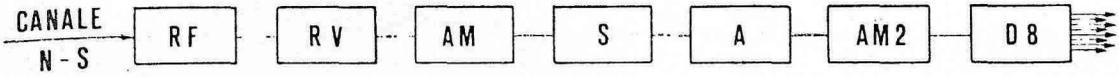
Le uscite che di volta in volta non sono utilizzate vengono chiuse su una resistenza (50Ω) pari all'impedenza caratteristica del cavo usato per portare il segnale onde evitare riflessione. Per quanto riguarda la catena di blocchi logici relativi all'amplificazione e compensazione dei ritardi, delle fasi e dei guadagni dei segnali provenienti dai due bracci del radiotelescopio: la fig. 16 ne è una esemplificazione.

I blocchi indicati hanno le seguenti funzioni:

RF) linee di ritardo fisse per equalizzare i diversi percorsi delle cabine alla stanza centrale (fig. 8a).

AM1 e AM2) amplificatori di media frequenza con larghezza di banda di 2 MHz centrata alla frequenza di 30 MHz per alzare il livello del segnale dopo l'attenuazione introdotta dai cavi e per sopprimere eventuali disturbi fuori banda.

16a)



16b)

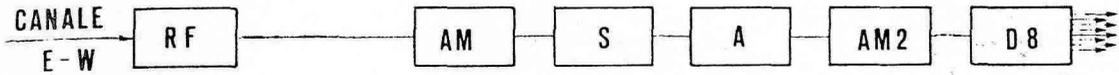
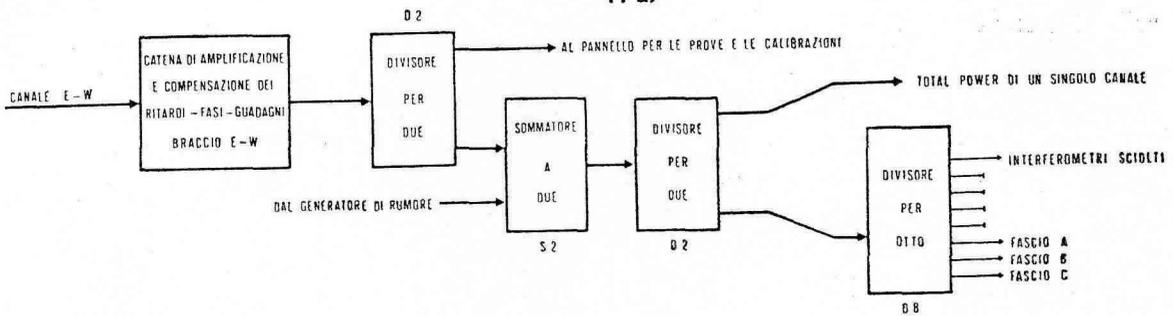


FIG. 16

Lo schema a blocchi sintetizza la catena di amplificazione e compensazione dei ritardi delle fasi, e dei guadagni che percorrono i segnali provenienti dal braccio E-W in a) dal braccio N-S in b).

17a)



17b)

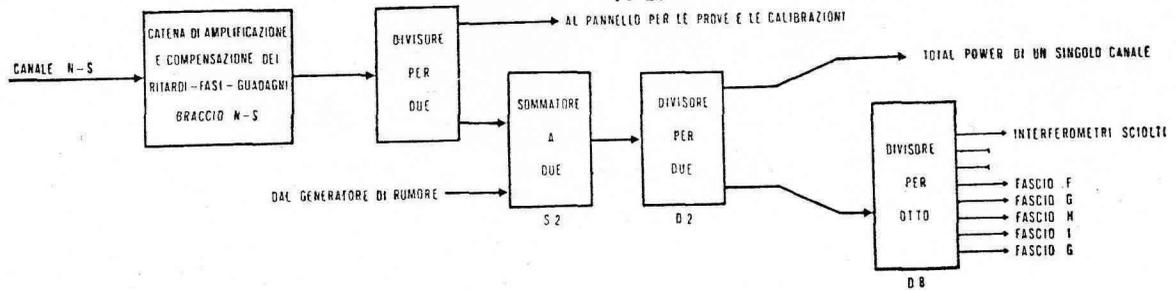


FIG. 17

Questo schema a blocchi va visto come una continuazione di quello riportato a fig. 16. Si possono notare l'ingresso del generatore di rumore per avere nella catena un segnale campione e la funzione del divisore che permette di avere a disposizione 8 segnali equivalenti e isolati per i diversi usi. Questa parte è equivalente nei canali provenienti dal braccio N-S in a) e dal braccio E-W in b).

AM1 e AM2 differiscono solo per l'amplificazione che nel primo è di 34 db e nel secondo 50 db.

S) sfasatori variabili che permettono il globale posizionamento angolare del fascio d'antenna mettendo in fase i segnali che provengono dai diversi canali.

A) attenuatori variabili per equalizzare i guadagni (perdite più amplificazione) dei differenti canali, essi servono pure ad ottenere eventuali attenuazioni richieste per correggere le forme del diagramma direzionale del sistema antenna-ricevitore (tapering).

RV) linee di ritardo variabili, per ridurre l'« aberrazione cromatica » (non è esatta la terminologia in quanto per le onde radio non si può parlare di colori, ma l'analogia è perfetta) del sistema antenna (N-S) ricevitore compensando le grosse differenze di cammino delle onde elettromagnetiche per arrivare sulle diverse antenne del ramo N-S, differenze di cammino che cambiano continuamente al cambiare del puntamento. Tale regolazione è fatta inserendo in un apposito lettore una scheda contenente l'informazione relativa alla declinazione di puntamento. Il sistema provvederà ad inserire i ritardi adeguati.

6. Sistema total power

Con questo metodo di lavoro che, sia dal punto di vista concettuale, che realizzativo, è il più semplice, si può registrare il segnale proveniente o da una singola cabina (total power di un canale singolo, fig. 18) e quindi corrispondente ad una sezione parziale o dell'E-W o all'intero N-S considerata come una sola antenna.

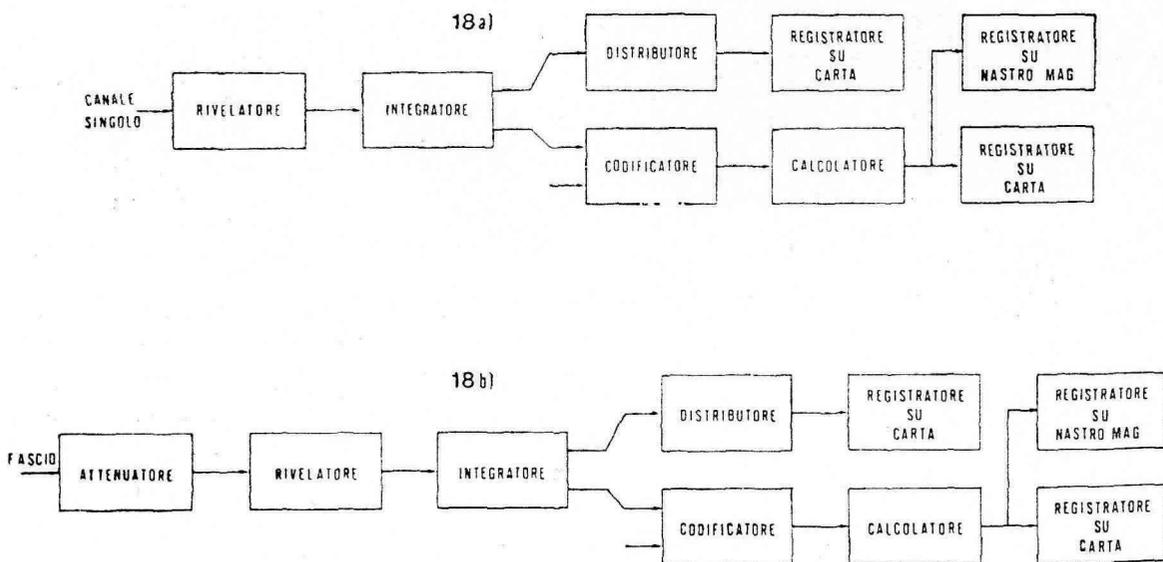


FIG. 18

Diagrammi indicanti i componenti elettronici percorsi dal segnale per ottenere la registrazione « total power » di un canale singolo in a) e di un singolo fascio in b).

Ne seguirà che il risultato se registrato su carta magnetica avrà la forma di fig. 21 che è analoga a quella di fig. 13. Dal punto di vista realizzativo, lo schema di fig. 18 sintetizza il tipo di trattazione che occorre operare sul segnale, sia che esso provenga da un singolo canale, sia che provenga da un fascio. Si inserisce un rivelatore che permette sostanzialmente di dare in uscita una tensione proporzionale alla potenza del segnale d'ingresso. Ora per spiegare la funzione dell'integratore premet-

tiamo alcuni richiami sul tipo di segnale che abbiamo a questo punto della catena di elaborazione elettronica. Si tratta di una tensione proporzionale alla potenza in arrivo sull'antenna, sovrapposta al rumore (cioè un segnale casualmente variabile) introdotto dai dispositivi elettronici preposti alla sua amplificazione ed elaborazione. Ora questo rumore, se viene integrato nel tempo, produce una risposta costante mentre l'effettivo segnale radioastronomico, se viene integrato opportunamente, rivela la radiazione incidente sull'antenna come variazioni nel tempo rispetto al precedente valore costante generato dal rumore.

In sintesi si può quindi asserire che l'integratore contribuisce a filtrare il segnale dal rumore all'uscita dai rivelatori.

Nel caso si voglia cercare di studiare fenomeni rapidamente variabili, si usa una costante di tempo d'integrazione breve per non perdere nessun dettaglio della forma di radioemissione; negli altri casi conviene usare costanti di tempo più lunghe per attenuare il più possibile l'effetto di fluttuazioni statistiche casuali.

A questo punto l'energia accumulata dall'integratore può essere misurata e convertita in un numero che il calcolatore «on-line» trascrive su di un nastro magnetico, oppure può essere mandata a comandare lo spostamento orizzontale del pennino di un registratore a carta.

Gli altri componenti di fig. 18 sono:

codificatore (encoder) che converte, per ogni canale, il livello di tensione del segnale all'ingresso in un numero proporzionale a tale livello;

calcolatore «Selenia GP 16» che ha molteplici funzioni, ma che in questo punto del diagramma logico legge i dati all'uscita del codificatore e ne fa una pre-elaborazione;

registratore su nastro magnetico che riceve i dati parzialmente elaborati dal «GP 16» unitamente all'informazione sul tempo siderale e sugli altri parametri che permettono la successiva trattazione finale dei dati;

distributore che permette di indirizzare il segnale analogico relativo ad uno qualunque dei segnali in uscita su uno dei registratori su carta disponibili per poter effettuare controlli o prove immediate;

registratore su carta che permette di visualizzare un tracciato la cui deflessione in senso ortogonale allo scorrere della carta è proporzionale al segnale in uscita. Esso può inoltre indicare, con una piccola deflessione, il tempo siderale. Ha incorporato un cambia scala automatico che permette di ottenere registrazioni complete anche di segnali con intensità notevole.

Prima del rivelatore nella catena total power dei fasci c'è anche un attenuatore che è utilizzato quando il segnale è così forte da risultare scomoda sia l'interpretazione delle registrazioni anche usando il cambio scala automatico, sia l'utilizzo degli attenuatori che sono sulle catene di amplificazione dei singoli canali (fig. 16).

7. Sistema « multifasci »

Il diagramma di fig. 19 illustra dettagliatamente la realizzazione dei 15 fasci correlati, che, come già ricordato, equivalgono a realizzare tutte le possibili interferenze fra i segnali corrispondenti all'antenna E-W, presa complessivamente e pun-

tata contemporaneamente con artificio elettrico in tre direzioni progressive partendo da E verso W (fascio A, B, C) e dall'antenna N-S presa complessivamente e puntata contemporaneamente con analogo artificio in cinque direzioni progressive da S verso N (fase F, G, H, I, J). Il diagramma risultante dalle registrazioni di uno qualunque dei fasci correlati al passare di una radiosorgente è quello di fig. 21 analogo a quello di fig. 14 a parte l'ovvia differenza dovuta al fatto che il sistema a multifascio del radiotelescopio Croce del Nord è un sistema di correlazione prodotto, mentre quello descritto in fig. 14 è, per motivi di semplicità descrittiva, di tipo somma.

Il componente più interessante del diagramma è il correlatore: il dispositivo che facendo la moltiplicazione analogica dei due segnali riesce a separare il segnale coerente ad entrambi gli ingressi da un rumore casuale 1000 volte più forte contemporaneamente presente agli ingressi. Questo è anche quello che si intende per correlazione in radioastronomia e più precisamente tutte le volte che questo termine è stato utilizzato in questo articolo.

8. Interferometri sciolti

Anche in questo caso il diagramma di fig. 20 illustra sinteticamente il sistema elettronico preposto alla realizzazione pratica del metodo di lavoro degli interferometri sciolti; come descritto nel paragrafo 4b), occorre in questo caso realizzare tutte le combinazioni interferometriche dei segnali provenienti dalle 6 sezioni del ramo E-W con quelli provenienti dalle 8 sezioni del ramo N-S. Quarantotto combinazioni che diventano 96 se si considera che per ciascuna vengono fatte due correlazioni sfasate di 90° .

Praticamente il correlatore che compare nello schema a blocchi è un dispositivo elettronico che realizza separatamente il prodotto in fase dei due segnali entranti ed il prodotto degli stessi sfasati di 90° .

Tutto questo per poter risalire alla direzione di provenienza del segnale che non è individuabile, in termini semplici, dal puntamento dell'antenna e dal tempo siderale corrispondente al passaggio della radiosorgente sul meridiano del radiotelescopio a causa delle peculiarità già accennate nel paragrafo 4a.

Non pretendiamo a questo punto di avere in così breve spazio chiarito completamente a chi non è addetto ai lavori il problema della elaborazione corretta del segnale ricevuto, ma pensiamo di avere evidenziato quali difficoltà ci sono quando si ha a che fare con fenomeni ondulatori e quali sono i principi ed i procedimenti che si seguono per affrontare e risolvere i problemi che si pongono. È proprio in questo spirito che spendiamo ancora alcune parole sulla funzione del « rotatore di fase » inserito nello schema di fig. 20. Precisiamo comunque che per una comprensione reale e completa della sua utilità occorrerebbe introdurre dei calcoli complicati per formulare matematicamente il problema che non è elementare e non facilmente riconducibile a discorsi semidivulgativi.

Nel metodo di elaborazione ad interferometri sciolti il tipo di segnale all'uscita dei correlatori è analogo a quello di fig. 14. Se si vuole riprodurre tale diagramma

senza perdere informazioni, occorre che la frequenza con cui vengono letti i dati all'uscita degli integratori sia superiore alla frequenza della « frangia ». Tale frequenza determina quindi un vincolo al massimo intervallo di tempo fra le letture di un dato e la lettura del dato successivo all'uscita degli integratori.

La possibilità di diminuire la frequenza della frangia senza alterare le informazioni contenute nel segnale può agevolare tutta la procedura di elaborazione dei dati. Il selettore di canale e i sei rotatori di fase (R.F.) inseriti nei canali E-W comandati opportunamente dal calcolatore permettono questa possibilità.

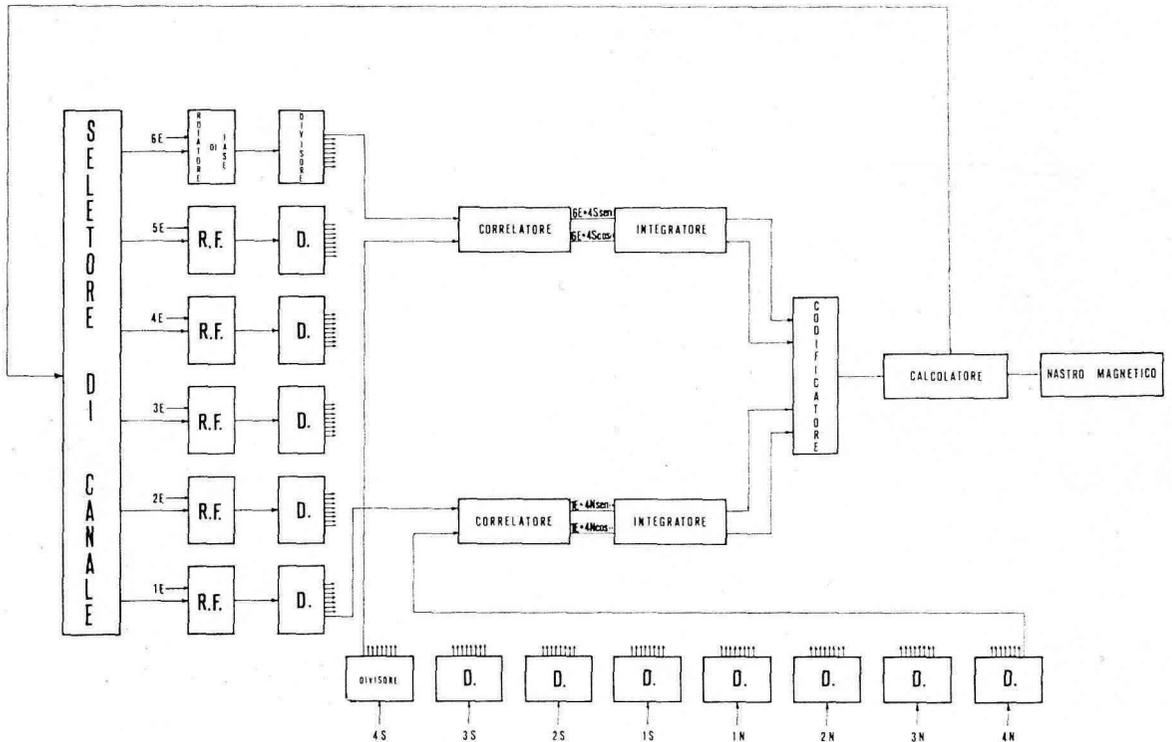


FIG. 20

Schema semplificato del sistema a interferometri sciolti; per semplicità invece dei 48 correlatori che operavano tutte le correlazioni possibili fra i canali E-W e N-S sono stati disegnati solo due correlatori.

Successivamente un codificatore trasforma in numeri la lettura all'uscita degli integratori per essere registrata su di un nastro magnetico e poter dare in seguito ad elaborazioni più sofisticate un'immagine radio della zona di cielo esplorata.

Le fig. 21 e 22 mostrano gli ottimi risultati ottenuti con questa tecnica di elaborazione, mentre la fig. 23 è una prova evidente della notevole stabilità del sistema specialmente per quanto concerne la capacità di riuscire a filtrare il segnale dal rumore. Si osservi che un'unità di flusso (F.U.) corrisponde ad una potenza di 10^{-26} watt/m² Hz. (L'utilità del rotatore di fase è maggiormente dettagliata nell'appendice B).

9. Strumentazione accessoria e specifiche strumentali

Oltre ai componenti essenziali illustrati nelle pagine precedenti, la stanza centrale contiene anche:

1) un orologio con precisione di una parte su un milione (cioè può sbagliare di 1/10 di secondo al giorno) che genera un impulso ogni minuto siderale da affiancare ai dati provenienti dall'antenna al fine di poter individuare l'ascensione retta (detta anche « angolo orario ») delle radiosorgenti;

2) tre generatori di « rumore » (uno nella cabina 1E, uno nella cabina 1N ed uno nella stanza centrale) per simulare, generando dei segnali di intensità prefissata, dei livelli di energia incidente sull'antenna da usarsi come campione di misura per rilevare l'intensità delle radiosorgenti;

3) un sistema di misura delle amplificazioni delle fasi delle varie parti del sistema ricevente;

4) due antenne orientabili in tutte le direzioni e collegate ad un sistema ricevente per individuare frequenza e posizione di eventuali sorgenti di disturbo di origine terrestre (ponti radio, ripetitori televisivi, ecc.) che trasmettono nella banda 406-410 MHz benché in un'apposita conferenza a Ginevra sia stata riservata alla radioastronomia.

È importante sottolineare che il guadagno e la fase di ciascun canale deve essere strettamente controllata per evitare la nascita di lobi secondari indesiderati nel diagramma direzionale d'antenna.

Il cambiamento di guadagno deve essere inferiore all'1% sopra un arco di 24 ore; il cambiamento di fase deve essere inferiore a 1 grado elettrico affinché i lobi laterali introdotti dal ricevitore siano più piccoli di quelli introdotti dal sistema dell'antenna.

Non ci interessa la stabilità su di un arco di tempo più lungo, poiché ogni giorno vengono rimisurati ed eventualmente riaggiustate le fasi ed i guadagni.

La risposta dei correlatori (indicati nei diagrammi a blocchi di fig. 19 e fig. 20) per segnali non coerenti deve essere inferiore di 1000 volte (30 db) rispetto all'analogia risposta per segnali coerenti.

La stabilità di guadagno a breve termine (cioè sopra un periodo di tempo dello stesso ordine di grandezza del tempo di transito di un punto sorgente attraverso il fascio del radiotelescopio) deve essere inferiore allo 0,1% per prevenire variazioni casuali nel livello del fondo causate da instabilità di guadagno che possano essere confuse con radiosorgenti. Tutte queste specifiche sono realizzate se la stanza centrale è mantenuta ad una temperatura costante (entro 1 °C): cosa che è realizzata da un apposito impianto di condizionamento e, per le apparecchiature più sensibili, da sistemi di termoregolazione.

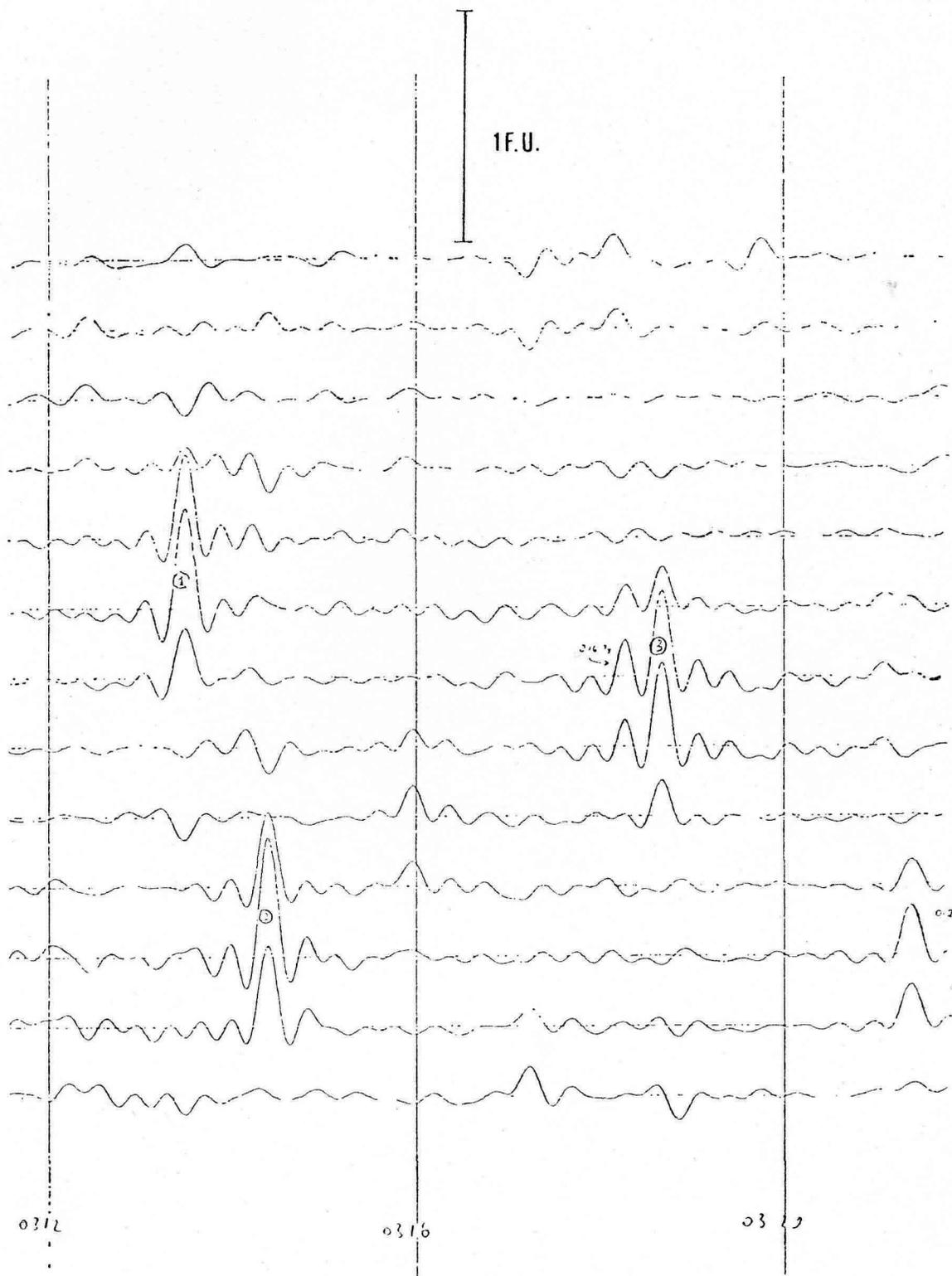


FIG. 21

La registrazione mostra il passaggio di una zona di cielo con il radiotelescopio « Croce del Nord » nella configurazione a interferometri sciolti. Si noti che il Sole ha una potenza di circa un milione di unità di flusso (f.u.). Si possono quindi osservare nella registrazione alcune radiosorgenti di qualche decimo di f.u.

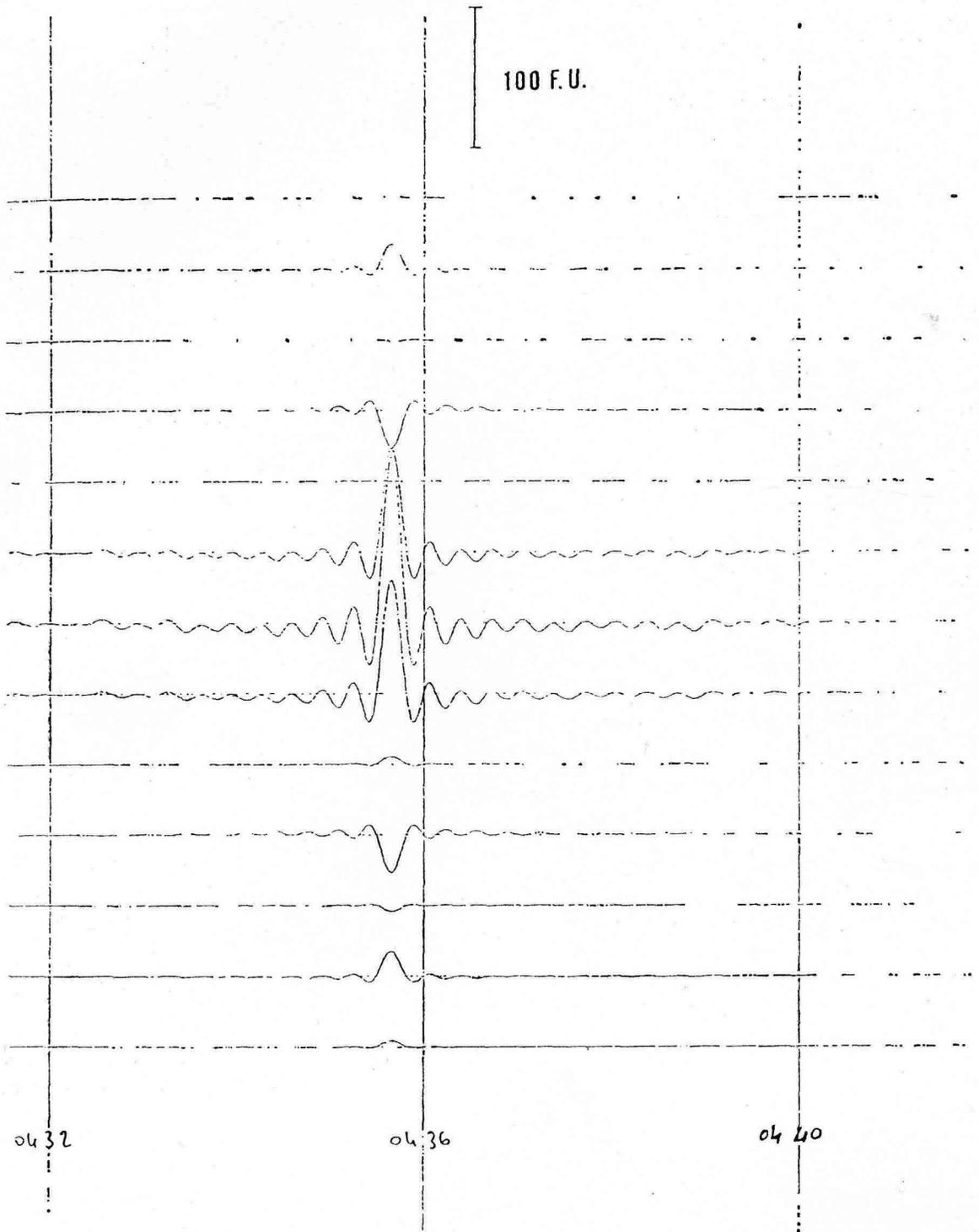


FIG. 22

La registrazione mostra come al passare di una radiosorgente come la 3C 123 (119 f.u.) il rumore della parte elettronica è pressoché insignificante. Tutto quello che non è una linea retta sono i lobi secondari della radiosorgente.



FIG. 23

Sono state fatte due registrazioni della stessa zona di cielo (nel grafico una risulta con segno più marcato dell'altra) in due sere differenti. Si noti, considerando la scala, la notevole riproducibilità del sistema.

APPENDICE A

Sistema ideato per ritardare in modo continuo con il puntamento i segnali provenienti da 2 antenne N-S

La velocità di propagazione di un segnale in un cavo coassiale vale $V = \sqrt{\epsilon\mu}$ dove ϵ è la costante dielettrica e μ la permeabilità magnetica del materiale interposto fra il conduttore centrale e quello estremo del cavo coassiale.

Se il segnale elettrico percorre un cavo coassiale di lunghezza fissa ma diviso in due zone (fig. 24a, 24b): nella prima il dielettrico è l'aria ($\epsilon > 1$) e nella seconda zona il dielettrico è, in parte, kerosene ($\epsilon > 1$) e quindi la velocità di propagazione sarà diversa nelle due zone; ne segue che il tempo per percorrere l'intero cavo vale:

$$T = \frac{L + K(L - L_1)}{C}$$

dove C = velocità della luce nel vuoto

K = costante che definisce il rallentamento della propagazione del segnale dove c'è il dielettrico

L = lunghezza del cavo

L_1 = lunghezza della parte di cavo riempita di kerosene.

Al variare di L_1 varia il tempo di propagazione del segnale e quindi il ritardo.

La realizzazione pratica è stata fatta utilizzando un cavo coassiale (fig. 24b) i cui conduttori sono due profilati a sezione quadrata in alluminio. Fra i due conduttori 4 tubi circolari di polipropilene (Moplen) servono a contenere il kerosene che viene usato come dielettrico.

In questo modo non tutto lo spazio fra i conduttori è riempito di kerosene diminuendo l'efficacia del rallentamento della velocità di propagazione del segnale ma favorendo una più semplice costruzione e un minor disadattamento elettrico fra la parte senza kerosene e quella con kerosene.

La distanza di 10 m fra un'antenna e l'altra permette agevolmente di utilizzare, tramite questo accorgimento, il normale percorso che dovrebbero in ogni modo fare i segnali provenienti dalle antenne per realizzare i ritardi variabili.

Infatti la regolazione della porzione di cavo coassiale riempita di dielettrico sufficiente a compensare i diversi ritardi di fase a seconda del puntamento viene fatta cambiando il livello, rispetto al terreno, del kerosene in un cavo coassiale rispetto al livello nell'altro cavo coassiale. Questa differenza di livello moltiplicata per la parte di cavo coassiale interessata dà il valore L della formula sopra riportata.

La messa in fase dei segnali avviene in ogni gruppo di otto antenne, ne segue che un modo semplice di realizzare questa caratteristica è di fare in modo che tutte le prime antenne afferenti alle cabine 4N, 3N, ..., 3S, 4S abbiano il kerosene allo stesso livello, tutte le seconde antenne abbiano di nuovo un livello uguale anche

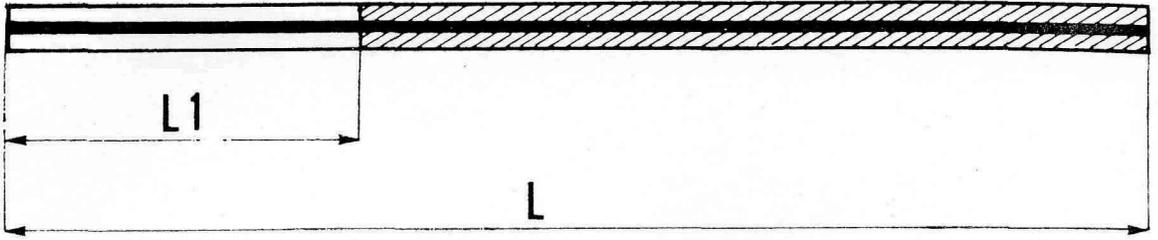


FIG. 24a

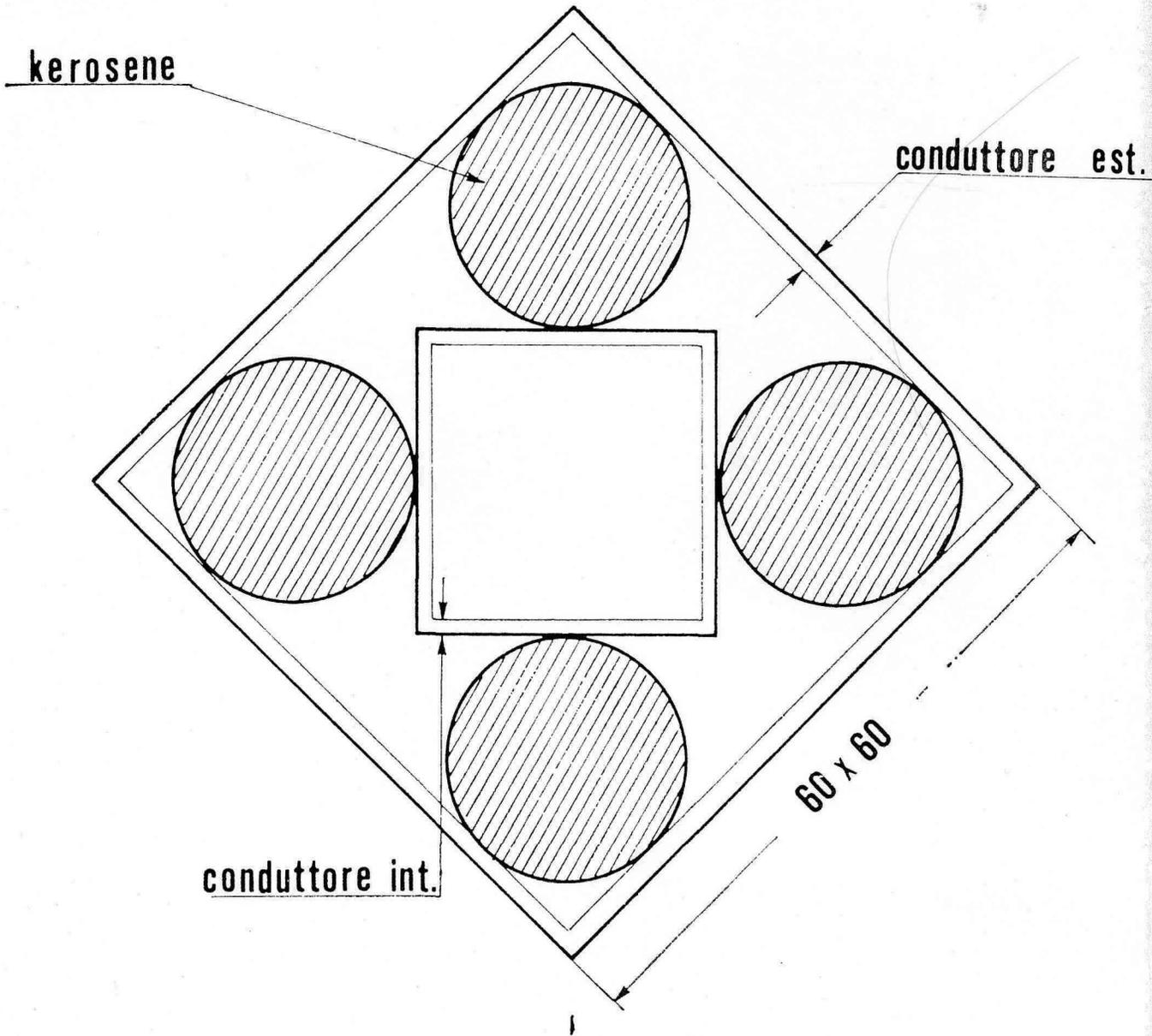


FIG. 24b

In a) è rappresentato schematicamente un cavo coassiale parzialmente riempito di dielettrico (parte tratteggiata). In b) il dettaglio costruttivo, ovvero la sezione del cavo coassiale realmente usato: si noti che sia lo schermo esterno che il conduttore interno sono di profilato a forma quadrata, per permettere il facile posizionamento dei 4 tubi per il kerosene.

se diverso dalle prime antenne e così di seguito per tutte le 8 antenne. La fig. 25 esemplifica come il semplice principio dei vasi comunicanti abbia permesso questa realizzazione. In una cabina è stato sistemato un serbatoio di kerosene che alimenta 8 cilindri, ciascuno dei quali è collegato ad un'antenna per ognuna delle 8 sezioni del ramo N-S (fig. 8a). Alzando un cilindro si alza il livello del kerosene in un punto del sistema e quindi si costringe il serbatoio a fornire kerosene nei tubi fino a che il livello nei cavi coassiali di tutte le 8 antenne ad esso collegate uguaglia quello del cilindro.

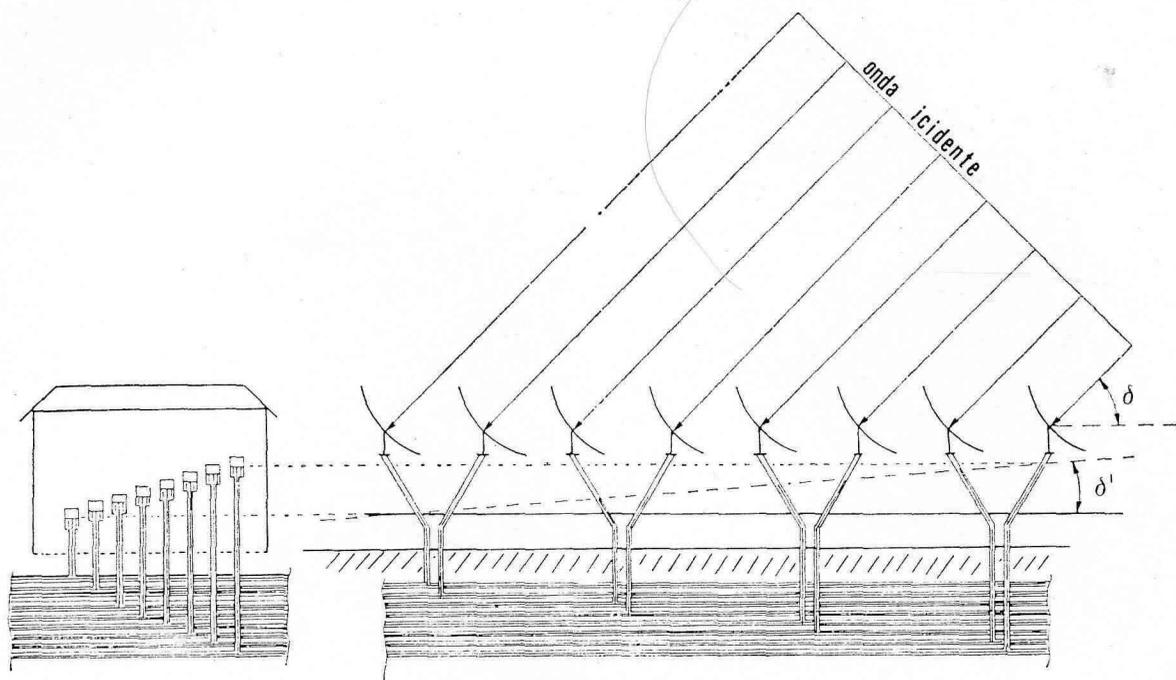


FIG. 25

La figura mostra il « sistema degli oli » per il recupero della fase ai diversi puntamenti in declinazione secondo quanto detto al paragrafo 3b). Sono state disegnate solo un gruppo di 8 antenne, poiché la situazione si ripete in modo analogo per gli altri 7 gruppi di 8 antenne. Si può notare come il principio dei vasi comunicanti permette, regolando l'altezza dei cilindri nelle cabine degli oli di regolare la quantità di cavo coassiale riempita di kerosene. Ovviamente δ' è proporzionale a δ . Si osservi come il livello del kerosene in ogni cilindro uguagli quello del liquido nel cavo relativo all'antenna ad esso collegata.

Ne segue che il grosso problema di regolare con continuità in funzione del puntamento le fasi dei segnali che escono dalle 64 antenne del ramo N-S si risolve semplicemente regolando opportunamente il livello degli 8 cilindri situati nella cabina di regolazione.

A 408 MHz per ottenere un ritardo fra un gruppo di 8 antenne ed un altro pari ad una lunghezza d'onda (360°), occorrono circa 4 metri di percorso, in cavo coassiale, con dielettrico kerosene. Le seguenti caratteristiche rappresentano i risultati tecnici ottenuti dal sistema.

Variazione di fase di 6° per 1 cm di livello.

Variazione di attenuazione per 360° di variazione di fase, 0.08 db.

Percentuale di aumento della lunghezza elettrica per 360° di variazione di fase, 19.5%.

APPENDICE B

Il sistema ad inseguimento di frangia

Come si vede dalla fig. 14 il prodotto dell'interferometria tra due antenne è costituito da una forma d'onda oscillante ad una certa frequenza i cui massimi costituiscono il cosiddetto « involuppo ». Questa frequenza è determinata da diversi parametri: il primo dipende dalla distanza che divide le due antenne e nel nostro caso è fisso (o meglio sono fisse tutte le distanze che collegano a due a due le diverse antenne che costituiscono i singoli interferometri), il secondo dipende dalla declinazione di puntamento. È facilmente intuibile che puntando le antenne vicine al Polo Nord le variazioni sono lente in quanto una sorgente rimane a lungo nel fascio di antenna, mentre in prossimità dell'equatore si ha la massima velocità di variazione (massima frequenza). Poiché l'elaborazione finale viene fatta da un grosso elaboratore elettronico, è necessario registrare tutte le informazioni utili del passaggio di una radiosorgente su nastro magnetico per consentire così la successiva elaborazione. Poiché le singole informazioni ottenibili da tutti gli interferometri sono 96 dobbiamo registrare su un unico nastro 96 diverse informazioni. L'unico modo per riuscire è di non registrare *tutta* l'informazione ma di prendere solo dei campioni ad intervallo di tempo prestabiliti, consentendo così di saltare da una informazione all'altra in successione. Sfortunatamente, per non perdere dettagli di nessuna informazione è necessario avere molti campioni per ciclo della frequenza di interferenza e poiché ciò vale per tutte le 96 informazioni distinte la quantità di informazione complessiva che il calcolatore dovrebbe gestire per registrare tutto correttamente è eccessiva. Si superano cioè i limiti di velocità propri della macchina oltre dover registrare una quantità enorme di dati.

Per ovviare a tutto questo (fig. 20) si inserisce su ogni canale E-W un rotatore di fase comandato dal calcolatore. Questi dispositivi consentono di modificare la fase del segnale in arrivo in modo continuo, consentendo così di cambiare la frequenza con cui il segnale prodotto dall'interferometria arriva al codificatore. Volendo si può annullare del tutto la frequenza interferometrica. In questa maniera è possibile diminuire molto la frequenza di campionamento dei segnali, riuscendo così a registrare tutte le informazioni necessarie in maniera tale da essere poi elaborate in un secondo tempo. A questo scopo sono sufficienti solo 6 elementi a sfasamento variabile. Infatti le 96 informazioni complessive sono ottenute dal prodotto dei 6 canali E-W per gli 8 canali N-S. Queste prime 48 informazioni vengono artificialmente sdoppiate in sede di correlazione, in informazione seno e coseno, divenendo così 96. Modificando solo i percorsi E-W è dunque possibile

modificare tutte e 96 le informazioni. Se ciò non fosse si sarebbe ricaduti nella impossibilità pratica di una simile realizzazione. Basti pensare che il calcolatore, per gestire correttamente i 6 sfasatori aggiorna le fasi anche a distanza di 1 millisecondo l'una dall'altra. Le fig. 26 e 27 mostrano in modo evidente la notevole utilità del rotatore di fase.

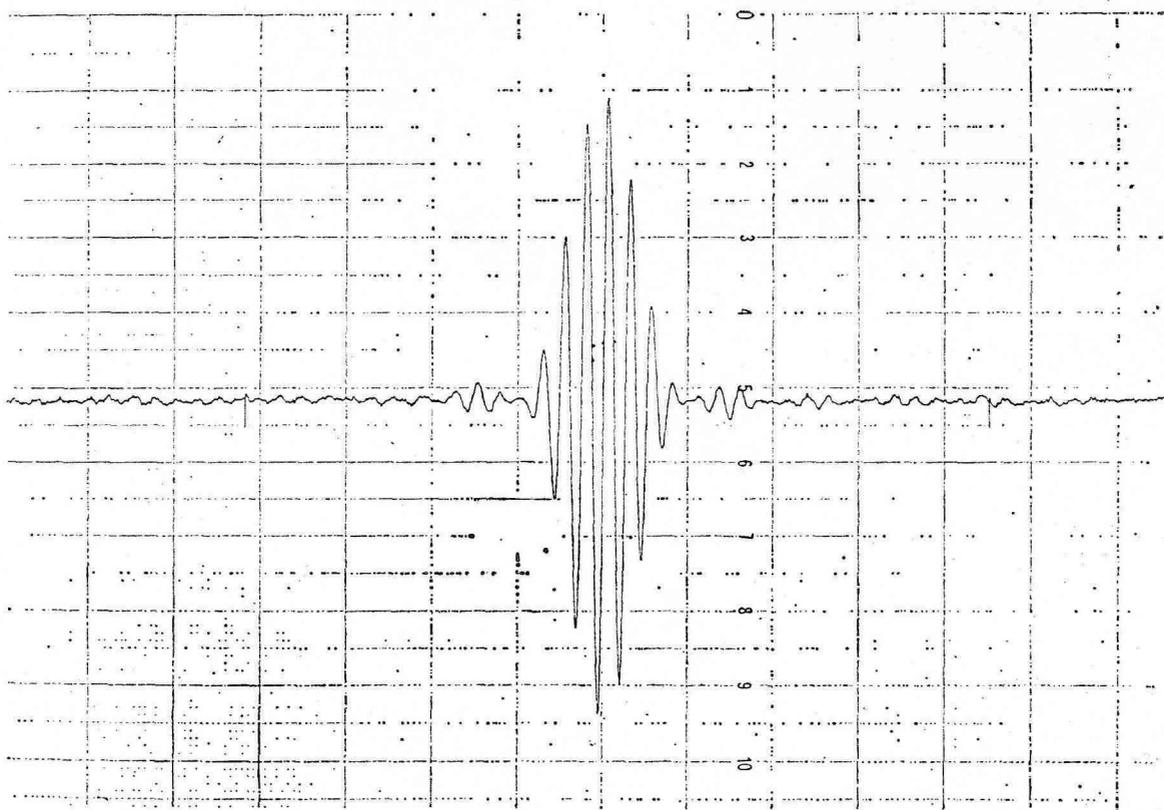


FIG. 26

Risposta interferometrica ottenuta osservando il passaggio di una radiosorgente (la 3C 123) senza inseguimento di frangia.

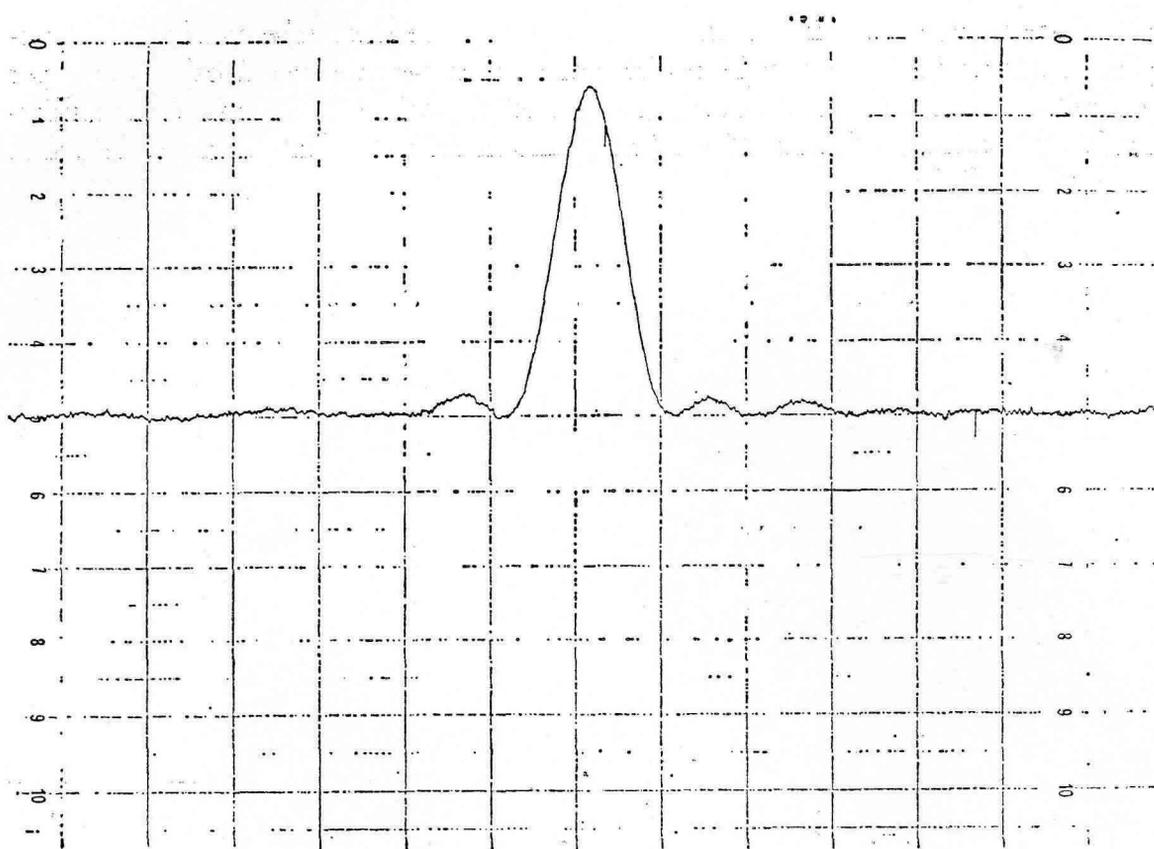


FIG. 27

Risposta dopo l'inseguimento di frangia al passaggio della stessa radiosorgente.

Bibliografia

- A. BRACCESI and M. CECCARELLI, « The Italian Cross Radio Telescope: I - Design of the Antenna », *Il Nuovo Cimento Serie X*, Vol. 23, pag. 208-215, 1962.
- G. GELATO C. ROSATELLI and G. SINIGAGLIA, « The Italian Cross Radio Telescope: II - Preliminary Design of the Receiver », *Il Nuovo Cimento Serie X*, Vol. 23, pag. 254-257, 1962.
- G. GELATO, C. ROSATELLI e G. SINIGAGLIA, « Il Ricevitore del Radiotelescopio Italiano a Croce », *Alta Frequenza* N. 9, Vol. XXXII, pag. 634, 1965.
- A. BRACCESI, M. CECCARELLI, G. GELATO and G. SINIGAGLIA, « A Simple and Accurate Liquid Dielectric Variable Length Line », *Proceedings of the IEEE*, Vol. 54, No. 1, pp. 69-70, 1966.
- G. COLLA e G. SINIGAGLIA, « Correlatori Impieganti Transistori a Effetto di Campo », *Alta Frequenza*, N. 7, Vol. XXXV, pag. 545-547, 1966.
- A. FICARRA, C. LARI, F. MAGAROLI, G. MINARELLI, F. PERUGINI, C. RIZZI, L. BENTIVOGLI, G. COLLA, A. GALLERANI, E. GANDOLFI, A. MICHELONI e G. TOMASSETTI, « Il Nuovo Sistema di Acquisizione dei Dati Operanti al Radiotelescopio "Croce del Nord" », *Alta Frequenza*, Vol. XLV, No. 9, 1976.
- G. GRUEFF e R. TREBBI, « Un Amplificatore e Filtro Passa Banda a 30 MHz per Il Radiotelescopio "Croce del Nord" », *Rapporto Interno*, Marzo, 1976.

Il radiotelescopio « Croce del Nord »

- L. COVA, A. GALLERANI, F. MAGAROLI, A. MICHELONI, F. PERUGINI, C. RIZZI e R. TREBBI, « Sistema Automatico per il Controllo delle Alimentazioni in Continua, dell'Impianto Ricevente del Radiotelescopio », Rapporto Interno, 1976.
- R. AMBROSINI, L. BENTIVOGLI, F. PERUGINI e G. TOMASSETTI, « Oscillatore-Amplificatore allo Stato Solido A 408 MHz per le Prove "A" e "B" del Radiotelescopio "Croce del Nord" », Rapporto Interno, 1976.
- R. AMBROSINI, L. BENTIVOGLI, A. FICARRA, A. GALLERANI, F. MAGAROLI, G. MINARELLI, F. PERUGINI, G. SINIGAGLIA e G. TOMASSETTI, « Il Sistema di Compensazione dei Ritardi nel Ramo N-S del Radiotelescopio "Croce del Nord" », Rapporto Interno 1976.
- R. AMBROSINI, L. BENTIVOGLI, F. MAGAROLI, G. MINARELLI, G. SINIGAGLIA e G. TOMASSETTI, « Il Ricevitore Radioastronomico "Mark 3" per la "Croce del Nord" », Rapporto Interno, 1976.
- A. BOMBONATI, L. COVA, G. GRUEFF e R. TREBBI, « Il Puntamento in Declinazione del Ramo Nord Sud del Radiotelescopio "Croce del Nord" », Rapporto Interno, 1975.

Gli autori ringraziano il sig. Baldeschi Luciano, per la preziosa collaborazione nella realizzazione dei disegni.