

## Gli iniziali 50 anni di STEP tecnologici associati ai ricevitori radioastronomici dell'IRA a Medicina

Dott. G. Tomassetti)

IRA 503/16

Nel 1960, durante la costruzione a Medicina del piccolo radiotelescopio-scuola che doveva operare a 327 MHz (il "Medicinoscopio"), all'Istituto di Fisica della Università di Bologna, due tecnici guidati dal giovane ingegner Sinigaglia stavano costruendo quello che è forse da considerare come primo ricevitore radioastronomico italiano. Del ricevitore non esistono più tracce come, purtroppo, dei loro progettisti e costruttori ma da descrizioni sommarie sappiamo che la tecnologia utilizzata non aveva alternative all'uso di unici e non sostituibili dispositivi termoionici di pessima fama in ambito scientifico relativa al loro generare rumore termico con associata instabilità di guadagno.

L'esperienza specializzata suggeriva, e con successo, l'applicazione di alcuni accorgimenti tecnici atti a migliorare soprattutto la stabilità del loro guadagno tramite l'uso di valvole professionali e alimentatori rigorosamente stabilizzati in tensione (anche per i filamenti delle valvole!). L'uscita d.c. del ricevitore veniva amplificata con amplificatori operazionali controllati da costosi chopper meccanici.

Con l'applicazione di tali accorgimenti tecnici, l'impianto di Medicina fu subito in grado di fare le prime osservazioni del Sole e di altre note sorgenti di media intensità. Per affinare le tecniche osservative del nuovo impianto venne progettato e costruito un nuovo ricevitore che, in via teorica, avrebbe potuto migliorare di circa 10 volte le prestazioni del precedente. Veniva con esso applicata la tecnica della moltiplicazione per rivelazione coerente o *correlazione*, già diffusa all'estero, destinata a sviluppi straordinari nei decenni a seguire.

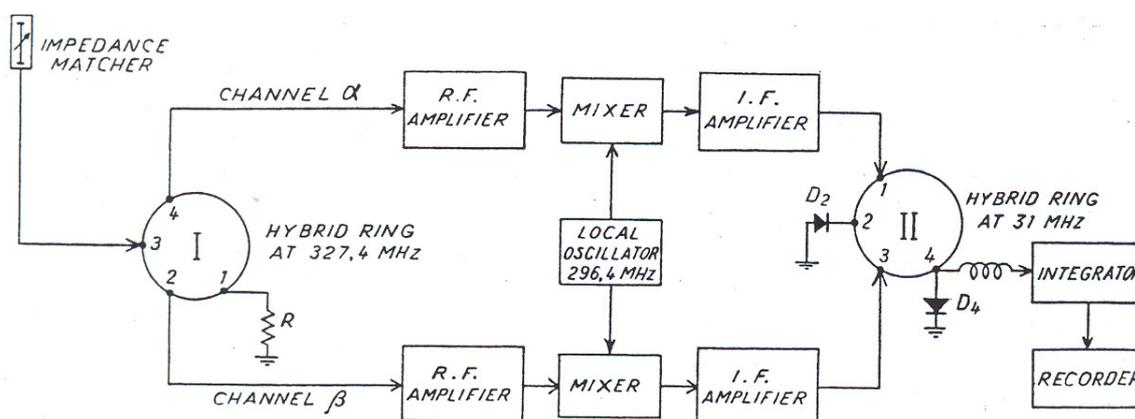


Figura 1

Con l'iniziale schema a blocchi di Fig. 1 viene indicato il percorso del segnale radioastronomico, proveniente dell'antenna. Alla prima suddivisione realizzata tramite un *anello ibrido*, segue un percorso obbligato, con conversione di frequenza, fino a raggiungere il secondo anello ibrido operante a *media frequenza* (I.F.) che per noi, fin da quei a quei tempi, è standardizzata al valore di  $(30 \pm 1)$  MHz). Tramite i due diodi ad esso collegati ed alla loro

fase di operazione, si otteneva la rivelazione con uscita utile in corrente continua provocata essenzialmente solo da segnali correlati e pertanto di certa provenienza celeste. Il miglioramento delle prestazioni fu rimarchevole tanto da permettere la pubblicazione di una bellissima mappa a 327 MHz della parte centrale della nostra Galassia (rivista PIRELLI di informazione e tecnica n. 3, 1962).

Acquisita la necessaria abilità scientifica e tecnica tramite l'uso del citato piccolo ricevitore operante a 327 MHz, il gruppo di ingegneri, da poco organizzato dal Prof. Ceccarelli, si dedicò alla progettazione del nuovo grande osservatorio a croce che avrebbe dovuto operare ad una frequenza considerata molto alta alla fine degli anni '50, come i 408 MHz, che risultava praticamente al limite della operatività della strumentazione disponibile nel nostro laboratorio.

Le previsioni dei progettisti del grande impianto ne prevedevano la certa risonanza mondiale anche per le finalità scientifiche che si proponevano di affrontare (si ricordino le teorie cosmologiche rivali!). Le necessarie locali tecnologie dovevano garantire la massima risoluzione spaziale della antenna e la massima sensibilità o minima temperatura di rumore che a quel tempo era praticamente ottenibile solo con l'uso di amplificatori parametrici di cui oggi, per la loro ormai superata unicità, si è dimenticata la preziosa funzione.

Del principio di funzionamento del prototipo progettato e realizzato dallo scrivente negli anni '60 si da ora una breve descrizione. Un amplificatore parametrico è costituito da un particolare diodo per microonde il cui circuito equivalente teorico lo indica come una importante reattanza capacitiva con in parallelo una modestissima componente ohmica reale, unica ed inevitabile fonte del rumore termico associato che risulterà modesto ma non nullo. Se il diodo, noto col nome di *varactor* (variable reactance) viene opportunamente terminato sulle corrette impedenze e quindi reso operativo a prefissate frequenze, è possibile verificare la generazione di un processo noto come *up conversion*, come previsto e allora calcolabile con le equazioni di Manley-Rowe. Il processo prevede un concreto guadagno di potenza pari al rapporto fra le frequenze dei segnali entranti.

Un esempio di un amplificatore parametrico a basso rumore e guadagno di circa 15 dB realizzato dallo scrivente in quegli anni è mostrato in Fig. 2.

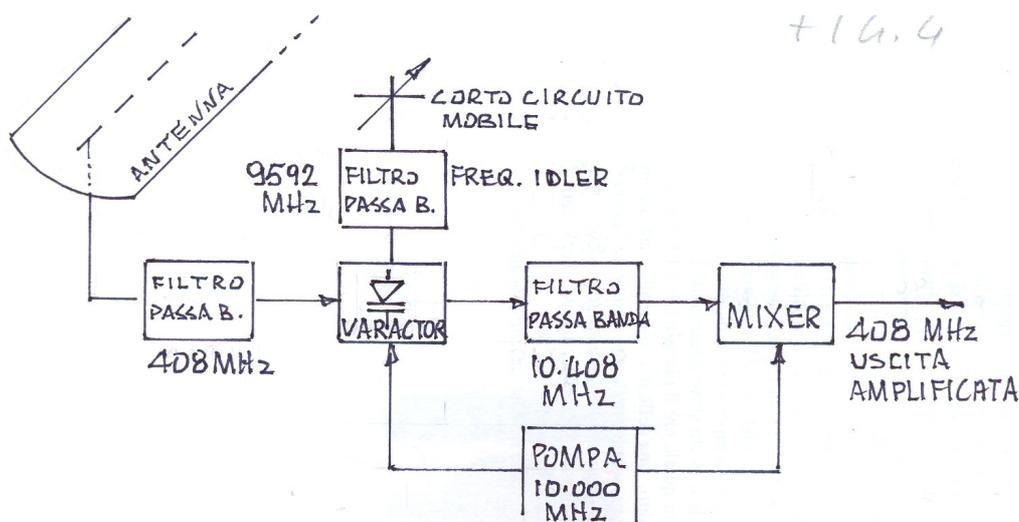


Figura 2

Al Varactor vengono applicati i segnali a 408 MHz provenienti dall'antenna e quello di un generatore locale a microonde noto come POMPA, operante alla frequenza nominale arbitrariamente fissata a 10 GHz ed a livelli dell'ordine di alcuni mW. Il Varactor genera, per conversione diretta, la somma e la differenza dei segnali entranti. Quello somma, pari a 10408 MHz, viene filtrato ed applicato al mixer esterno. Quello differenza a 9592 MHz, non risultando utile, viene caricato su una adatta terminazione passiva. Il segnale somma e quello di pompa, per battimento tramite il mixer passivo esterno, restituiscono il segnale di antenna a 408 MHz, amplificato a basso rumore, di circa 15 dB. Il guadagno dipende, come previsto teoricamente, dal rapporto tra le frequenze di pompa a 10 GHz e quello di ingresso a 408 MHz. Con la configurazione di Fig. 2 è stata misurata una temperatura di rumore a 408 MHz inferiore ai 100 Kelvin, un risultato quasi miracoloso a quei tempi.

Nel paio d'anni di intensa attività di ricerca sperimentale nel campo specifico non venne meno l'interesse per altre eventuali soluzioni per realizzare un *front end* allo stato solido in attesa dello sviluppo di transistori che in quegli anni non erano ancora in grado di operare proficuamente a 408 MHz. Venne infatti sperimentato anche un discusso componente: il diodo TUNNEL da poco introdotto sul mercato. Vennero costruiti alcuni amplificatori ottenendo risultati incoraggianti come 500 K di temperatura di rumore ma, essendo tale diodo un dispositivo che sfrutta la sua zona a resistenza negativa, tende, potenzialmente, più ad oscillare che ad amplificare per cui il suo eventuale impiego fu rapidamente rinviato.

Le previste difficoltà tecniche relative all'uso degli amplificatori parametrici stavano intanto convincendo i responsabili a discutere sulla opportunità e convenienza di insistere con i *front end* di tale tipo. Si pensi alla necessità di distribuire i ricevitori lungo i 600 metri della antenna a ciascuno dei quali sarebbe stato necessario fornire potenza di pompa con identica fase a microonde. Considerate le perdite di potenza nella distribuzione, fu calcolato che il generatore di pompa dovesse essere costituito da un *klystron* capace di erogare alcuni Kw in banda X ! In alternativa sarebbe stato necessario utilizzare tante *pompe* locali di piccola potenza costituite ancora da da generatori *clystron* sincronizzati a microonde o da una rete di moltiplicatori a *varactor* di indebita complessità. Fu subito scartata l'ipotesi di usare guide d'onda per fornire il necessario livello di pompa a ciascuna unità ricevente per la lunghezza e peso che ne sarebbero risultati. Anche il progetto "parametrico" fu così inevitabilmente accantonato.

Con la pressante necessità di essere pronti a ricevere il cielo con la Est-Ovest che stava rapidamente crescendo, abbandonati almeno per il momento, i progetti utilizzando tecniche avanzate, ci si applicò alla realizzazione ed ottimizzazione di un *front end* classico costituito da un mixer ad anello ibrido, ben noto nel nostro ambiente, progettato, in modo originale, anche meccanicamente, dall'allora tecnico e studente Goliardo Tomassetti, mostrato in Fig. 3. La ottimizzazione richiedeva di progettare (ing. Rosatelli) e costruire un energico filtro di ingresso per limitare la ricezione della frequenza immagine a 348 MHz (378 MHz dell'O.L. meno i 30 MHz della I.F. = 348 MHz) L'uso di diodi rivelatori posti all'ingresso degli amplificatori di media frequenza a 30 MHz che, per la prima volta (!) utilizzava transistori (ing. Gelato), richiese una scelta molto attenta sia dei componenti che della circuitistica, necessaria per proficuamente adattare le relative impedenze. Il mixer passivo in ingresso, mostrato assieme ad una parte del ricevitore in Fig. 3 avrebbe garantito la massima stabilità e semplicità ma ovviamente ci si doveva accontentare di operare la Croce con oltre 900 K di temperatura di rumore che, per iniziare, poteva andare bene!

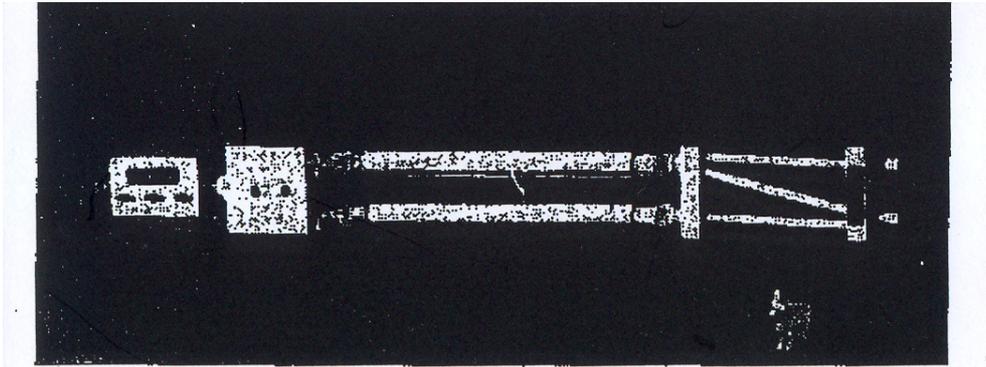


Figura 3

Nel frattempo il mercato dei semiconduttori che era in un momento di forte espansione e che aveva appunto permesso di usare transistor al germanio (lo "storico" AF102) negli stadi di media frequenza, prometteva guadagni elevati e rumore basso fino alle UHF.

Una prima versione di *front end* a transistor con cui la temperatura di rumore dei ricevitori fu più che dimezzata avvenne nel 1967. Il circuito più in auge in quel periodo era il *cascode* che prevedeva l'uso di due transistor PNP e NPN elettricamente in serie e alimentazioni in continua di entrambe le polarità come mostrato in Fig. 4.

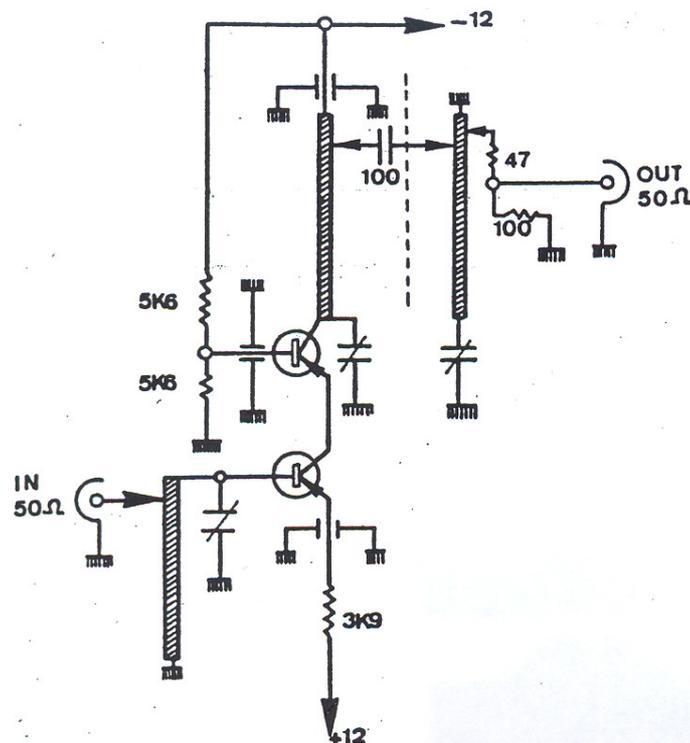


Figura 4



meccanica (fusione in bronzo dei contenitori), della accurata termostatazione ed alimentazione in continua, dell'uso di circuitistica allo stato dell'arte, come suggerito dal prototipo sperimentale di Fig. 6.

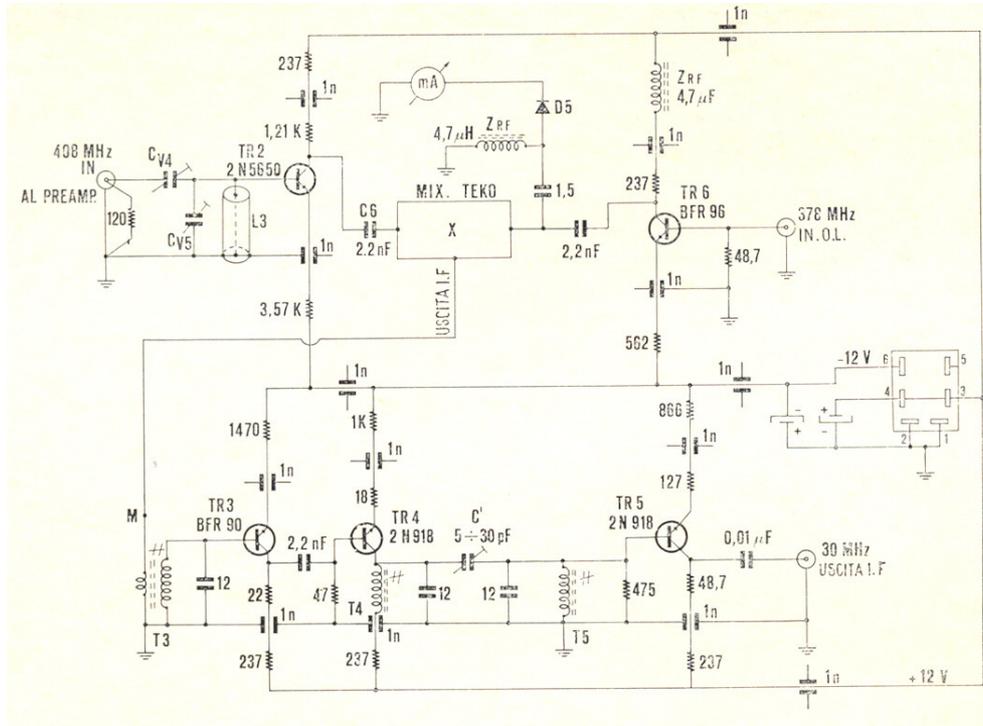


Figura 6

Il *front end* di questo progetto mostrato in Fig. 7 è costituito da un transistor al silicio 2N5650 *neutralizzato* per evitare che potesse diventare instabile o addirittura oscillare a causa delle sue capacità interne, venne pubblicato su "Electronic Engineering" e scelto dai lettori internazionali come miglior progetto del 1978! Lo scrivente, a Londra per motivi di lavoro, non mancò di ritirare il premio posto in palio dall'Editore, costituito da un televisore portatile tascabile, una vera novità per quei tempi! Si erano finalmente raggiunte temperature di rumore del ricevitore inferiori, anche se di poco, ai 100 K!

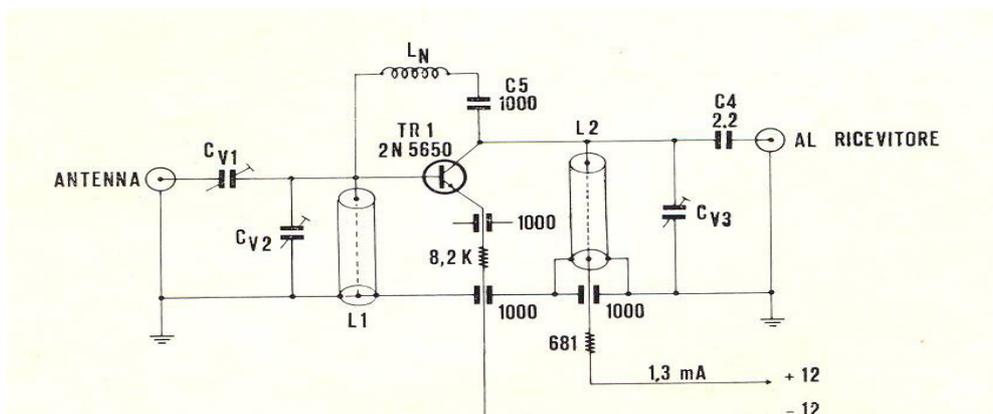
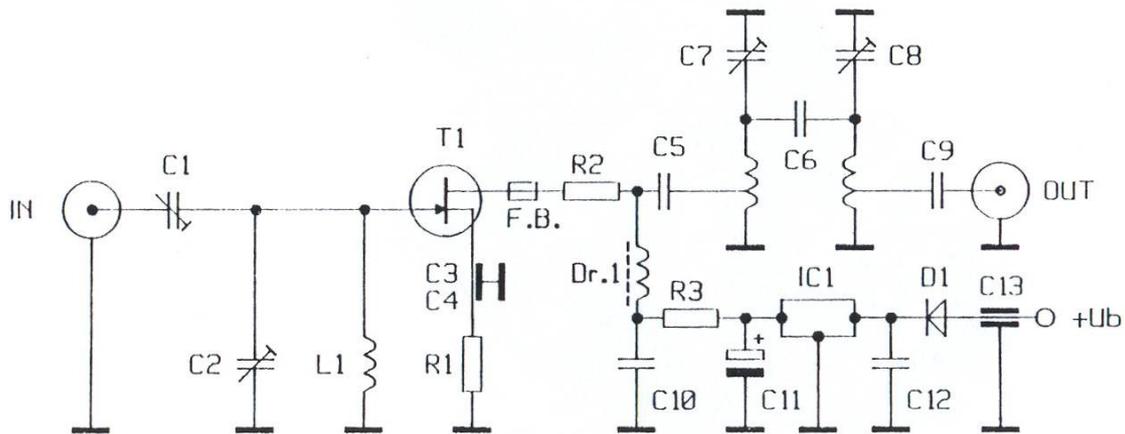


Figura 7

Al lettore va però chiarito che per ottenere la effettiva temperatura di lavoro del radiotelescopio ( $T_{sys}$ ), alla temperatura di rumore del ricevitore di 100 K va sommata la temperatura del cielo che a 408 MHz è prossima ai 40 K e la preponderante equivalente temperatura di rumore della linea di trasmissione di discesa, comunque necessaria per collegare l'antenna alla cabinetta che alloggia e protegge il ricevitore, valutabile attorno ai 300 K. Complessivamente, la temperatura di sistema a cui si operava rimane al valore relativamente alto di circa 440 K che in ogni caso risulta inferiore alla metà di ogni precedente prestazione.

A questo punto è stato necessario considerare che per ridurre ulteriormente la temperatura di rumore del sistema il vero problema non sarebbe consistito nell'operare sui *front end* ma sulle lunghe linee di trasmissione. Una soluzione banale considerata è stata quella di installare i ricevitori o parte di essi non più all'interno delle cabinette ma direttamente in alto, alla uscita di ciascuna delle sei sezioni di antenne. Soluzione possibile ma di realizzazione pratica oltremodo complessa che venne subito abbandonata. In quel periodo si rese disponibile sul mercato un transistor che avrebbero potuto amplificare di quasi 20 dB la nostra banda di ingresso a 408 MHz garantendo una temperature di rumore inferiori ai 50 K, la metà di quella dei nostri *front end*! Acquisito tale componente vennero progettati e costruiti due nuovi amplificatori a bassissimo rumore ed una sezione della Est-Ovest della Croce fu resa operativa per la necessaria verifica sperimentale da protrarsi nel tempo. Alcuni anni dopo, accertatone (finalmente) l'ottimo funzionamento e quindi la validità della soluzione e accertata la reperibilità commerciale di *front end* analoghi a quelli da noi inizialmente sperimentati (vedi schema commerciale di Fig. 8), partì la campagna preamplificatori da distribuire lungo tutto il ramo Est-Ovest, che si concluse nel 1992.



**Figura 8**

Uno dei sei contenitori stagni che contengono in ambiente termostato i moderni *front end* è mostrato in Fig. 9. Tutti sono tutt'ora (2007) egregiamente in funzione malgrado la loro

modesta origine quali recipienti per il trasporto del latte, utilizzati dalle aziende agricole circostanti l'radio impianto di Medicina!



Foto 1

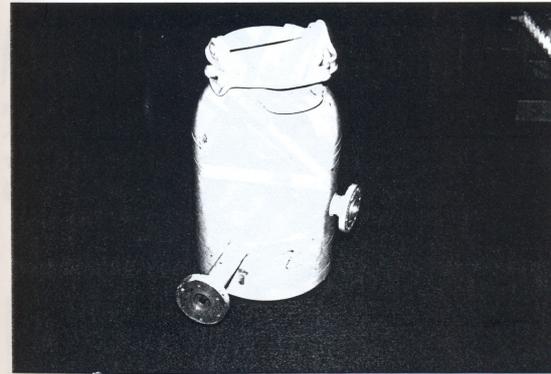


Figura 9

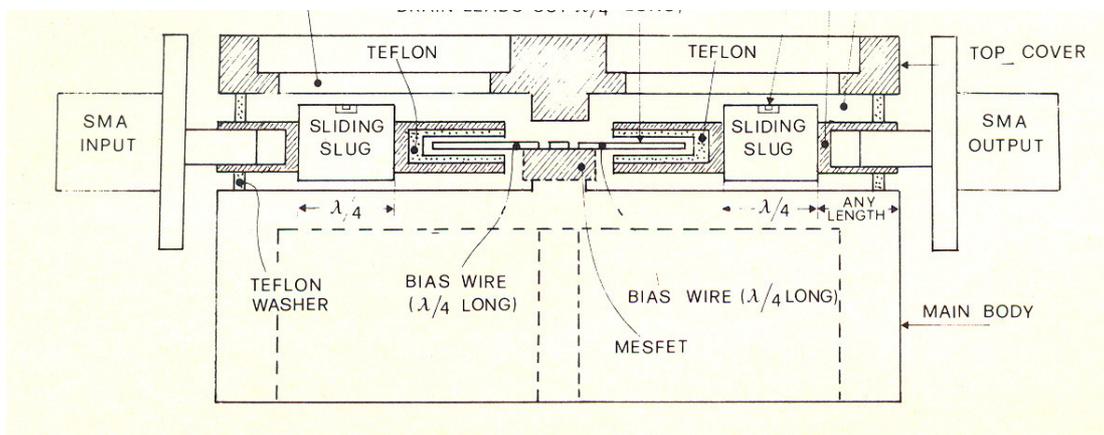
La temperatura attuale della "Croce del Nord" a seguito di questi ultimi miglioramenti, vanta una **temperatura di sistema prossima ai 150 K** da confrontare con i 440 K precedenti. Un miglioramento di quasi 3 volte che non potrà prevedibilmente essere ulteriormente migliorato, almeno in termini di temperatura di rumore, applicando tecniche tradizionali.

All'inizio degli anni '80, con l'avvio della progettazione del paraboloide di 32 metri di diametro che avrebbe dovuto operare almeno fino a coprire la riga del vapor d'acqua a 22.3 GHz, il gruppo Radio Frequenze dell'IRA fu impegnato alla progettazione ed eventuale costruzione di apparati a microonde che, nel caso dello scrivente, si rifacevano alle sue esperienze maturate negli anni '60 con la costruzione di un amplificatore parametrico con una temperatura di rumore di circa 100 K, quasi un miracolo a quei tempi! Anzi, alcuni strumenti e componentistica varia fu riutilizzata con successo!

Le richieste dei radioastronomi erano pressanti: un utilizzo proficuo del nuovo strumento richiedeva la costruzione a microonde di *front end* a bassissima temperatura di rumore unitamente a tutta una serie di accessori come mixer, oscillatori locali e altro che non erano disponibili sul mercato. Le tecnologie ed i componenti non consentivano amplificazione a microonde. Un suggerimento prevedeva che il segnale di ingresso venisse convertito al tradizionale valore di media frequenza a 30 MHz con un T magico, iniettando un oscillatore

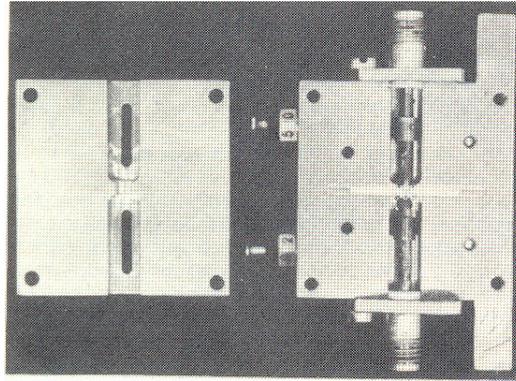
locale, magari del tipo allo stato solido come quelli a diodi GUNN che erano già disponibili. Un ricevitore così concepito avrebbe potuto garantire temperature di rumore non inferiori ai 1000 K, totalmente ed ovviamente inaccettabili.

Verso il 1982 vennero prodotti a prezzi molto elevati gli HEMT (High Electron Mobility Transistor) che apparteneva alla classe ottimizzata dei transistori ad effetto di campo (FET), già ampiamente usati (benché a frequenze molto più basse) a Medicina nei correlatori dell'ingegner Sinigaglia. Per chi fosse stato in grado di utilizzarli, i costruttori garantivano temperature di rumore dell'ordine dei 150 K in banda X con guadagni di potenza superiori ai 6 dB! Non veniva pubblicato ma da fonti attendibili americane si mormorava che tali dispositivi avrebbero potuto funzionare anche a temperature criogeniche (15 K?). Ricordando che nei FET le cariche che partono dall'elettrodo di ingresso raggiungono quello di uscita attraversando un canale resistivo che necessariamente genera rumore per agitazione termica, (dipendente pertanto dalla temperatura fisica di funzionamento), risulta ovvio che tale rumore avrebbe potuto diventare praticamente nullo raffreddando fisicamente il dispositivo fino a temperature criogeniche. Queste erano le premesse pertanto si poneva il problema di realizzare un suo montaggio pratico con cui implementare le specifiche dichiarate dal costruttore ed anche quelle non dichiarate e cioè che avrebbe potuto funzionare, con il previsto grande vantaggio, a temperature estremamente basse. Negli USA ma anche in Europa si stavano sperimentando soluzioni tipo circuito stampato o qualcosa di analogo ma con modesti risultati. Una soluzione circuitale vincente fu proposta dell'Autore di questa nota e inizialmente sperimentata con successo nei nostri laboratori di Medicina è quella schematizzata in Fig. 10.



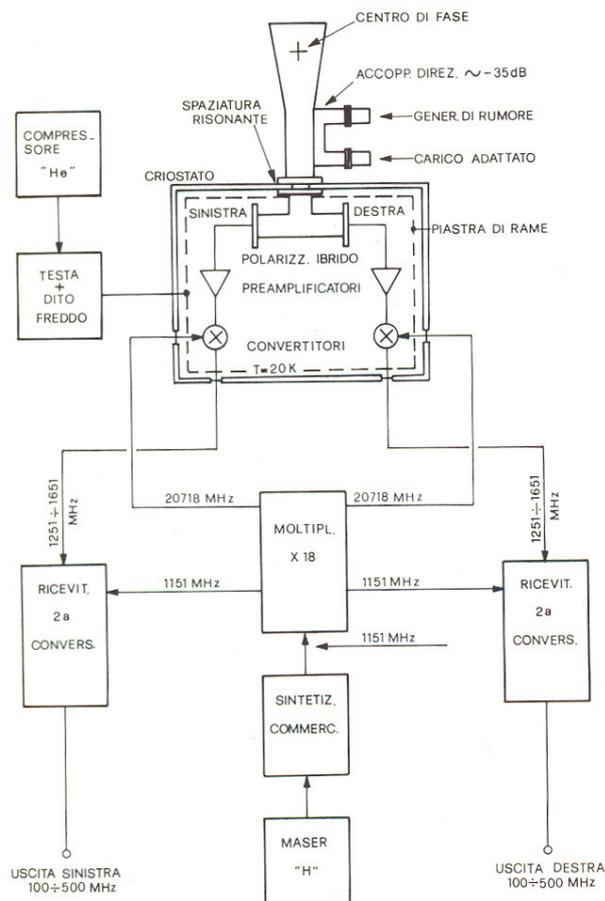
**Figura 10**

Si notino i reofori di ingresso ed uscita dello HEMT, accorciati per diventare linee risonanti tagliate lunghe  $\lambda/4$  per la frequenza di operazione, risultano infilati all'interno delle linee coassiali di ingresso e uscita senza contatto fisico per cui possono liberamente dilatarsi in sicurezza a seguito anche di grandi variazioni di temperatura fisica. Sulle linee coassiali possono scorrere i trasformatori di impedenza per il necessario adattamento dell'HEMT all'impedenza di utilizzo esterno classicamente fissata a 50 ohm. La sua realizzazione meccanica è mostrata in Fig. 11.



**Figura 11**

Questo "scatolino" come venne chiamato, raffreddato a 10 K era in grado di garantire un guadagno in banda X di poco inferiore ai 10 dB ed una temperatura di rumore di circa 50 K. Una bomba a quel tempo. Non a caso fece il giro del Mondo ed una sua versione americana è probabilmente ancora usato nel VLA del Nuovo Messico! A titolo di esempio viene mostrato in Fig. 12 il ricevitore a due canali utilizzato a Medicina per la ricezione a 22.3 GHz.



**Figura 12**

In questa particolare circostanza sia i due *front end* ma anche gli originali mixer a HEMT da noi progettati sono alloggiati all'interno della camera da vuoto in cui sono garantite le condizioni al contorno per agevolmente operare a 15 K di temperatura fisica.

Interessante far notare che anche il moltiplicatore di frequenza x 18 è un prodotto IRA con ampio uso di componenti HEMT.

Il ricevitore ha permesso di individuare tutta una serie di Maser H<sub>2</sub>O grazie ad una temperatura di sistema, prossima ai 50 K.

Negli anni duemila, grazie alla abbondanza di componenti facilmente acquistabili dalle industrie produttrici sia nazionali che estere, i radio dispositivi per uso radioastronomico vengono raramente progettati e costruiti nei nostri laboratori, salvo quelli a frequenze molto elevate.