

Pubblicazioni
dell'Istituto Nazionale di Geofisica del Consiglio Nazionale delle Ricerche
diretto dal prof. Antonino Lo Surdo

N. 45

G. ZANOTELLI

Nuovo metodo di ricezione
a cambiamento di frequenza
per telegrafia con microonde

ROMA
ANNO MCMXL - XVIII

NUOVO METODO DI RICEZIONE A CAMBIAMENTO DI FREQUENZA PER TELEGRAFIA CON MICROONDE (*)

Memoria di GUGLIELMO ZANOTELLI (1)

RIASSUNTO. — Il sistema di ricezione a cambiamento di frequenza per microonde di 16 cm. esposto nella Memoria prescinde dalla necessità di modulare il trasmettitore e di stabilizzare la frequenza delle microonde, con l'accorgimento di variare leggermente la frequenza dell'oscillatore locale del ricevitore al fine di riportare periodicamente la frequenza di battimento a cadere nella banda di passaggio dell'amplificatore; si consegue in tal modo contemporaneamente nello stesso ricevitore la modulazione a bassa frequenza necessaria alla ricezione acustica. Il metodo, che viene nella Memoria discusso e giustificato teoricamente, realizza una sensibilità assai più elevata di quella ottenibile con i ricevitori per microonde a rivelazione diretta, ed elimina l'influenza perturbante delle fluttuazioni di frequenza. Nella Memoria viene interpretata inoltre teoricamente l'origine della modulazione spontanea che si riscontra nella frequenza di battimento di due microonde, attribuendola all'azione delle forze elettromotrici del rumore di fondo delle valvole generatrici.

INTRODUZIONE.

È noto che nelle trasmissioni con microonde si incontrano alcune difficoltà per l'applicazione della tecnica usuale alle frequenze più basse, che limitano la possibilità di un razionale sfruttamento di questo tipo di trasmissione. Mentre nella realizzazione dei ricevitori difetta un sistema di amplificazione diretta della radiazione e l'amplificazione di effettua in genere a frequenza più bassa dopo una rivelazione iniziale, nella realizzazione del trasmettitore l'introduzione della modulazione porta di solito un abbassamento dell'efficienza del trasmettitore stesso, legato al prin-

(*) A complemento delle Memorie: *Sulla propagazione delle microonde in prossimità della superficie terrestre* (Pubblicazioni dell'Istituto Nazionale di Geofisica del Consiglio Nazionale delle Ricerche, nn. 1, 5 e 22).

(1) Presentata nell'Adunanza del 16 dicembre 1939-XVIII, dall'Accademico ANTONINO LO SURDO. Vedi a pag. 21 la Relazione approvata nell'Adunanza del 19 gennaio 1940-XVIII.

cipio di funzionamento di questo. Infatti sia nel generatore a magnetron che in quello a campo frenante la forma delle traiettorie elettroniche è legata alle grandezze dei campi di forza fra gli elettrodi, ed il controllo dell'intensità della radiazione emessa non può eseguirsi razionalmente agendo con variazioni sulle tensioni generatrici di tali campi. D'altra parte la realizzazione della trasmissione telegrafica con onde modulate a frequenza più o meno bassa ha la sua ragione di essere nella limitazione del tipo di ricevitore a cui si è già accennato, in quanto la frequenza modulante è quella che dovrà poi essere amplificata alla ricezione in un rapporto e con una tecnica non certo comparabili ad un'eventuale amplificazione della componente continua rettificata, nel caso in cui si usufruisse di un generatore ad onde non modulate. Per una precedente ricerca (1) nella quale si era adottata la trasmissione con onde non modulate in quanto si riteneva di doversi evitare ogni eventuale modulazione di frequenza, l'autore ha sperimentato vari accorgimenti per realizzare alla ricezione l'interruzione e la modulazione della componente continua rettificata, al fine di renderla suscettibile di agevole amplificazione, ma con esito poco soddisfacente salvo nel caso in cui il campo elettromagnetico ricevuto fosse molto forte. È noto d'altra parte che i tentativi di realizzazione di ricevitori a cambiamento di frequenza; per frequenze estremamente elevate, i quali permetterebbero l'uso dell'oscillatore di nota alla ricezione hanno dato scarsi risultati per l'instabilità delle frequenze emesse e quindi anche della frequenza di battimento tranne che nel caso in cui sia possibile provvedere con particolari sistemi alla stabilizzazione (2).

Nel presente lavoro verrà descritto e discusso un nuovo tipo di ricevitore a cambiamento di frequenza, realizzato per l'esecuzione della ricerca che ha fatto oggetto del lavoro sopra citato, con il quale è possibile la modulazione dell'onda ricevuta, e che prescinde da ogni accorgimento per la stabilizzazione della frequenza delle microonde.

Tale ricevitore unito ad un trasmettitore per microonde manipolabile, costituisce un sistema sostanzialmente nuovo di trasmissione telegrafica con microonde, che presenta la caratteristica di non richiedere alcuna modulazione del trasmettitore, evitando quindi ogni diminuzione di efficienza di questo come si verifica ordinariamente nella modulazione per tramite delle tensioni di alimentazione, per il fatto che il valore di

(1) A. LO SURDO, G. ZANOTELLI, « Memorie della R. Accademia d'Italia », serie VI, vol. XI, fasc. I, 1940-XVIII. (Pubblicazione n. 22 dell'Istituto Nazionale di Geofisica del C. N. R.).

(2) Cfr. A. ALLERDING, W. DAELLENBACH, W. KLEINSTEUBER, H. F. T., 51, 96 (1938); A. G. CLAVIER, E. ROSTAS, « Electr. Comm. », 16, 254 (1938); A. H. REEVES E. H. ULLRICH, « Electr. Comm. », 16, 153 (1937); H. STRAUBEL « H. F. T. », 47 152 (1936) e 46, 4 (1935).

tali tensioni è in generale assai critico nei riguardi del funzionamento corretto del trasmettitore. Si effettua inoltre un'amplificazione, sia pure indiretta, del segnale a frequenza elevatissima nel ricevitore, in quanto si sfrutta per l'amplificazione una frequenza di battimento di ampiezza uguale al prodotto delle ampiezze delle oscillazioni, e che quindi può rendersi assai grande aumentando l'intensità della oscillazione locale. È possibile ottenere così una sensibilità molto elevata e non comparabile con quella di un ricevitore a rivelazione diretta.

Lo studio di questo nuovo sistema di trasmissione, basandosi sul fenomeno del cambiamento di frequenza per combinazione di due microonde, in modo da ottenere la frequenza differenza, e che chiameremo di battimento, ha richiesto un'indagine preventiva su questo fenomeno che verrà esposta qui di seguito, prima di entrare nella descrizione del principio di funzionamento del ricevitore, in quanto la conoscenza dei risultati ottenuti è assai interessante e necessaria alla perfetta intelligenza del principio stesso.

CARATTERI DELLA FREQUENZA DI BATTIMENTO DI DUE MICROONDE.

È possibile ottenere la frequenza di battimento di due microonde disponendo di due generatori uguali ed ugualmente alimentati e di un elemento di circuito a caratteristica non lineare nel quale le due oscillazioni si sovrappongano e si combinino, seguito da un opportuno amplificatore per l'ascolto e la misura e che dovrà essere naturalmente adatto alla banda di frequenza in cui si desidera che la frequenza del battimento cada. Se si sperimenta ad esempio nella gamma delle frequenze acustiche si riscontra in genere che non si ottiene per un certo regime di alimentazione dei generatori un suono di nota altissima, e che si possa via via abbassare agendo su qualcuna delle tensioni, fino ad arrivare alla frequenza nulla, e ciò anche predisponendo di un mezzo sufficientemente fine per la regolazione della tensione stessa. Si riscontra invece che in corrispondenza di una certa tensione compare bruscamente un rumore caratteristico di andamento irregolare, composto dal susseguirsi e sovrapporsi di suoni di frequenza diversa ed in generale assai bassa, e che, in difetto di particolari accorgimenti di stabilizzazione, fluttua intermittenemente in conseguenza della variazione spontanea delle tensioni di alimentazione. Se ci si trasporta gradatamente nella ricezione su frequenze sempre più alte, fino ad arrivare a frequenze dell'ordine di 10^7 p/s ⁽¹⁾ si riscontra

(1) F. W. GUNDLACH, « H. F. T. », 48, 201 (1936); T. MULERT, « H. F. T. », 42, 194 (1933) e W. PISTOR, « Jahrb. drahtl. Tel. », 35, 135 (1930), hanno potuto utilizzare il battimento ottenuto sulla gamma delle onde corte per la misura esatta della frequenza delle microonde.

sempre, dopo una conveniente rivelazione, la presenza di un rumore con caratteristiche identiche a quelle descritte, e che compare bruscamente per l'aggiustamento della tensione di alimentazione in genere su due valori diversi e vicini, che vanno continuamente variando al variare della frequenza di battimento ottenuta. Più precisamente mentre in corrispondenza delle condizioni adatte per il battimento nullo si ottiene invece un miscuglio di frequenze acustiche, in corrispondenza delle condizioni adatte per ottenere il battimento per esempio di 10^7 p/s si riscontra la presenza di tale frequenza intensamente modulata, e cioè fornita di componenti laterali formanti due bande di modulazione.

Il fatto che tali suoni si producono anche per differenze di frequenza così rilevanti e le loro fluttuazioni in dipendenza di quelle delle tensioni di alimentazione hanno richiesto che prima di ogni altra cosa venissero esaminate più accuratamente le modalità di produzione della frequenza di battimento e le sue variazioni in dipendenza di quelle delle tensioni. Come è noto i valori delle tensioni influiscono fortemente sul funzionamento dei generatori elettronici, sia magnetron che a campo frenante, anche se per questo ultimo tipo esistono certe condizioni di funzionamento per le quali la frequenza emessa dipende prevalentemente dalle dimensioni degli elettrodi della valvola e dalle costanti del circuito utilizzatore. Si è scelto per l'esecuzione delle esperienze un generatore di quest'ultimo tipo, costituito da una lampada UC 16 S. F. R. capace di generare l'onda di circa cm. 16, alimentata con batterie di accumulatori di sufficiente capacità per assicurare una perfetta costanza delle tensioni attraverso ad un opportuno complesso di regolazione e controllo delle tensioni e correnti di griglia, placca, filamento. La suddetta lampada costituisce un triodo a campo frenante, la cui griglia si chiude con gli estremi a formare un circuito cui è connessa un'antennina rettilinea contenuta nello stesso bulbo di vetro della lampada (1). Disponendo due di tali generatori di microonde ad una certa distanza fra loro è stato possibile rilevare dopo l'opportuna regolazione delle tensioni, ed aggiustando accuratissimamente la tensione di placca di una delle lampade, la presenza della frequenza di battimento i cui caratteri sono stati sopra descritti. Come elemento a caratteristica non lineare si usava una terza lampada UC 16 accesa a tensione ridotta con bassa tensione di griglia e placca leggermente positiva, in modo da costituire un diodo a catodo virtuale (2), dalla quale mediante accoppiamento ad impedenza capacità poteva trasferirsi la corrente rivelata all'amplificatore per la fre-

(1) Cfr. E. PIERRET, « C. R. », 186, 124, 1601 (1928); A. CLAVIER, « Electr. Comm. » 12, 3 (1933).

(2) Cfr. N. CARRARA, « Alta Freq. », 6, 104 (1937); H. E. HOLMANN, *Phys. u. Techn. d. uk. Wellen*, ed. J. Springer, 1936, vol. II, cap. I.

quenza di battimento. Tale amplificatore era del tipo a bassa frequenza a due stadi per il rilevamento delle frequenze acustiche, mentre invece per le frequenze più elevate si usava un vero radiorecettore di grande selettività ed a più gamme d'onda, in modo da coprire in maniera praticamente continua tutto il campo di frequenze compreso tra $2 \cdot 10^4$ p/s e $2 \cdot 10^7$ p/s.

CARATTERISTICHE STATICHE FREQUENZA-TENSIONE.

Come si è già detto la regolazione della tensione di placca, che costituisce l'elettrodo frenante della valvola, doveva eseguirsi con la massima accuratezza giacchè la minima variazione portava la scomparsa del battimento il quale si trasportava in un altro punto della gamma di frequenza, e poteva essere ritrovato spostando corrispondentemente la sintonia del ricevitore: questo risultato sperimentale mette in luce quanto siano rilevanti le variazioni di frequenza anche nel tipo di generatore prescelto, in cui tuttavia la frequenza emessa dipende prevalentemente dalle costanti dei circuiti elettrodici. Per chiarire l'andamento del fenomeno era essenziale rilevare le caratteristiche frequenza-tensione delle lampade usate, il che si è eseguito in funzione delle variazioni di tensione di placca, per tensioni e correnti di griglia e di accensione costanti. La misura si eseguiva con il metodo delle onde stazionarie nell'aria, e con gli opportuni accorgimenti per poter rilevare variazioni percentualmente molto piccole della lunghezza d'onda. Per mezzo di un amplificatore per corrente continua, munito all'uscita di voltmetro termioinico si potevano rilevare le correnti di un rettificatore a cristallo posto a notevole distanza ed allineato con la lampada generatrice da sperimentare, dietro la quale e pure a notevole distanza, al fine di evitare ogni eventuale perturbazione dell'emissione, si spostava parallelamente a se stesso uno specchio piano normale all'asse di allineamento. Tale specchio, costituito da una grande e spessa lastra metallica era sostenuto verticalmente da apposito carrello mobile su rotaie e trascinato da un motore elettrico ad inversione di marcia ed a velocità regolabile comandato dal punto dove si osservava l'andamento del voltmetro termioinico. Era possibile con questo sistema di contare il passaggio di 20 onde complete, determinando le posizioni iniziale e finale del carrello corrispondenti ad un minimo con approssimazione di circa mm. 3, e cioè con un errore nella misurazione della lunghezza d'onda di circa $\pm 1\%$. Il sistema di misura adottato, che evita gli inconvenienti della misura con onde stazionarie sui fili, e specialmente l'accorgimento di tener lontani dal generatore sia lo specchio che l'elemento ricevitore assicurano ai risultati una grande attendibilità ed esattezza. Nella figura 1 sono riportate le caratteristiche statiche frequenza-tensione di placca rilevate per due regimi differenti in un piccolo intervallo

di variazione della tensione per ciascuna delle lampade impiegate come generatrici, che sono la UC 16 S. F. R. n. 600191.24 che verrà nel seguito designata con la lettera B, e la UC 16 n. 600191.15 che verrà designata con R. Nella figura 2 è riportato, in funzione della tensione, l'andamento medio dedotto dalle curve precedenti, della derivata della frequenza rispetto alla tensione, che come si vede varia piuttosto lentamente ed è dell'ordine di 10^6 p/s per Volt.

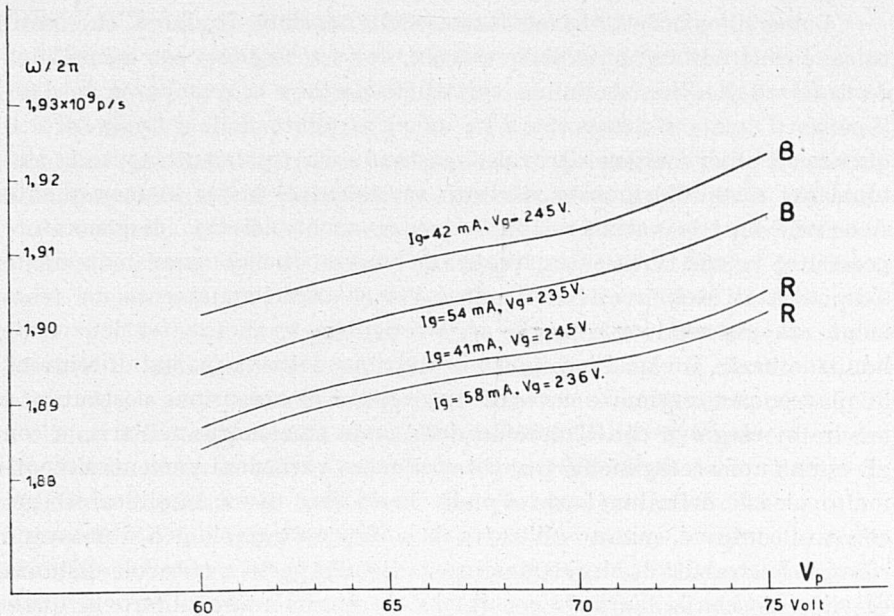


Fig. 1.

Se, in base a questi risultati sperimentali si tiene presente che oltre alle piccole fluttuazioni naturali delle tensioni delle batterie esistono nelle stesse lampade generatrici altre fonti di piccole forze elettromotrici variabili, come le forze elettromotrici di agitazione termica nelle resistenze e nei conduttori, l'effetto granulare dell'emissione elettronica, che costituiscono il rumore di fondo della lampada, si verifica con un semplice calcolo che ora esporremo che in condizioni dinamiche queste forze elettromotrici possono determinare una modulazione di frequenza della oscillazione emessa, e quindi anche della frequenza di battimento risultante dalle due oscillazioni.

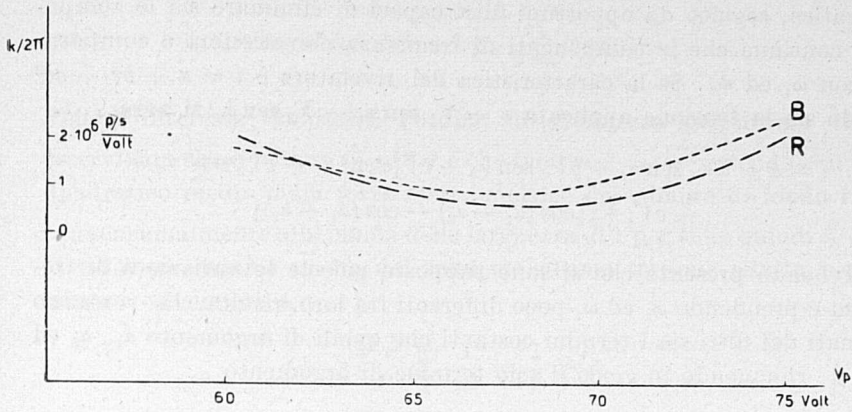


Fig. 2.

LA MODULAZIONE SPONTANEA DELLA FREQUENZA DI BATTIMENTO.

Si consideri il caso in cui l'oscillazione generata dalla lampada sia di forma sinusoidale $\text{sen } \alpha_1$, ove l'argomento α_1 è funzione lineare del tempo e la pulsazione è definita da $\omega_1 = d\alpha_1/dt$ e perciò costante. Supponiamo che per qualche ragione e per esempio a causa di piccole variazioni delle tensioni di alimentazione la frequenza subisca delle piccole variazioni, cioè la pulsazione diventi funzione del tempo della forma $\omega_1 + k e_1(t)$ essendo $e_1(t)$ la variazione di tensione e k una costante il cui valore nel caso delle lampade da noi adoperate si aggira intorno a $2\pi \cdot 10^6$ p/s per Volt, ritenendosi per semplicità la variazione di frequenza proporzionale, in prima approssimazione e per piccole variazioni, alla variazione di tensione. In tale ipotesi l'argomento α_1 assume la forma, essendo ψ_1 una costante

$$\alpha_1 = \omega_1 t + \psi_1 + k \int e_1(t) dt$$

e naturalmente la forma della oscillazione, intervenendo una modulazione di frequenza non risulta più sinusoidale in funzione del tempo. Anche per una seconda lampada, la cui oscillazione abbia la forma $\text{sen } \alpha_2$ supporremo

$$\alpha_2 = \omega_2 t + \psi_2 + k \int e_2(t) dt$$

avendò posto per semplicità k uguale per le due lampade.

Si immagini ora che le due oscillazioni vengano a sovrapporsi in un rivelatore costituito da un elemento di circuito a caratteristica per esempio quadratica, seguito da opportuni filtri capaci di eliminare sia le componenti continue che le componenti di frequenza elevatissima e comparabile con ω_1 ed ω_2 . Se la caratteristica del rivelatore è $i = a + bv + cv^2$ quando sia la tensione applicata $v = V_1 \text{sen } \alpha_1 + V_2 \text{sen } \alpha_2$ si avrà

$$i = a + bV_1 \text{sen } \alpha_1 + bV_2 \text{sen } \alpha_2 + cV_1^2 \text{sen}^2 \alpha_1 + cV_2^2 \text{sen}^2 \alpha_2 + \\ + cV_1 V_2 [\cos (\alpha_1 - \alpha_2) - \cos (\alpha_1 + \alpha_2)]$$

Tenendo presente che si sono supposte piccole le variazioni di frequenza e prendendo ω_1 ed ω_2 poco differenti fra loro, risulta che verranno eliminati dai filtri sia i termini costanti che quelli di argomento α_1 , α_2 ed $\alpha_1 + \alpha_2$, rimanendo in gioco il solo termine di argomento

$$\alpha_1 - \alpha_2 = (\omega_1 - \omega_2) t + \psi_1 - \psi_2 + k \int [e_1(t) - e_2(t)] dt.$$

S'immagini ora che le due funzioni $e_1(t)$ ed $e_2(t)$ rappresentino le forze elettromotrici, sovrappontesi alle tensioni di alimentazione, di agitazione termica, dell'effetto granulare dell'emissione, che possiamo ritenere per lampade del nostro tipo le cause principali del rumore di fondo della valvola termoionica e che, come è noto, ricoprono con uno spettro praticamente continuo tutta la gamma delle frequenze con una intensità pressochè costante. Potremo rappresentare tali forze elettromotrici come funzioni periodiche del tempo a valor medio nullo e di frequenza molto bassa, per esempio 1 p/s, dal momento che l'orecchio non riscontra per solito nel rumore di fondo fluttuazioni di periodo maggiore, funzioni sviluppabili in serie trigonometriche

$$e_1(t) = \sum_1^{\infty} \varepsilon \cos(2\pi nt + \varphi_{1n}) \quad , \quad e_2(t) = \sum_1^{\infty} \varepsilon \cos(2\pi nt + \varphi_{2n})$$

dove si sono prese le ampiezze delle varie componenti tutte uguali fra loro e per le due lampade in base al dato sperimentale che il rumore ha approssimativamente lo stesso valore su tutte le frequenze, e si può ritenere uguale per lampade uguali ed ugualmente funzionanti, e dove le φ_{1n} , φ_{2n} hanno valore qualunque.

La funzione $e_1(t) - e_2(t)$ sarà anche della forma

$$e_1(t) - e_2(t) = \sum_1^{\infty} \varepsilon_n \cos(2\pi nt + \varphi_n)$$

dove

$$\varepsilon_n^2 = 2\varepsilon^2 [1 - \cos(\varphi_{1n} - \varphi_{2n})] \quad , \quad \text{tg } \varphi_n = - \text{cotg } \frac{\varphi_{1n} + \varphi_{2n}}{2} \quad ,$$

e l'argomento $\alpha_1 - \alpha_2$ risulta quindi, eseguendo l'integrazione per serie e ponendo $\omega_1 - \omega_2 = \omega_0$, $\psi_1 - \psi_2 = \psi$,

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \omega_0 t + \psi + k \sum_1^{\infty} \frac{\varepsilon_n}{2\pi n} \text{sen}(2\pi nt + \varphi_n).$$

Poichè interessa conoscere l'ordine di grandezza dell'ultimo termine osserviamo che è sempre $\varepsilon_n^2 \leq 4 \varepsilon^2$ e che inoltre $\varepsilon^2 = 2 \bar{e}^2$ essendo \bar{e}^2 il valore quadratico medio della forza elettromotrice del rumore di fondo riferito convenzionalmente alla banda della larghezza di 1 p/s: si ha quindi $\varepsilon_n^2 \leq 8 \bar{e}^2$. Il valor quadratico medio del suddetto ultimo termine risulta pertanto minore od uguale a

$$\frac{k^2 \bar{e}^2}{\pi^2} \sum_1^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{1}{6} k^2 \bar{e}^2.$$

PEARSON (1) ha riscontrato dalle misure eseguite su un triodo a riscaldamento diretto per il valor quadratico medio riferito alla banda di 1 p/s della forza elettromotrice totale di rumore di fondo un valore dell'ordine di 10^{-16} Volt². Prendendo per k il valore da noi trovato $k = 2\pi 10^6$ p/s per Volt si ha che il valor quadratico medio del termine

$$k \sum_1^{\infty} \frac{\varepsilon_n}{2\pi n} \text{sen}(2\pi nt + \varphi_n)$$

è minore di 10^{-3} .

In base a questo risultato riterremo che anche il quadrato di detto termine sia trascurabile di fronte all'unità e cioè che si possa porre

$$\cos \left[k \sum_1^{\infty} \frac{\varepsilon_n}{2\pi n} \text{sen}(2\pi nt + \varphi_n) \right] = 1,$$

$$\text{sen} \left[k \sum_1^{\infty} \frac{\varepsilon_n}{2\pi n} \text{sen}(2\pi nt + \varphi_n) \right] = k \sum_1^{\infty} \frac{\varepsilon_n}{2\pi n} \text{sen}(2\pi nt + \varphi_n)$$

da cui risulta

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) &= \cos(\omega_0 t + \psi) - \text{sen}(\omega_0 t + \psi) \sum_1^{\infty} \frac{k\varepsilon_n}{2\pi n} \text{sen}(2\pi nt + \varphi_n) = \\ &= \cos(\omega_0 t + \psi) + \sum_1^{\infty} \frac{k\varepsilon_n}{2\pi n} \{ \cos[(\omega_0 + 2\pi n)t + \psi + \varphi_n] - \cos[(\omega_0 - 2\pi n)t + \psi - \varphi_n] \}. \end{aligned}$$

Appare da questa espressione che attorno alla frequenza di battimento esiste una banda con componenti di ampiezza decrescente iper-

(1) G. L. PEARSON, « Bell. Sy. Tech. Journ. », 13, 634 (1934).

bolicamente in funzione della distanza da quella, e rappresentante la modulazione dovuta alle forze elettromotrici del rumore di fondo; è interessante notare che tali componenti hanno quindi tanto maggiore importanza per quanto la frequenza è più bassa.

Appare pertanto giustificata l'interpretazione già avanzata di attribuire alle forze elettromotrici di rumore di fondo la modulazione spontanea che si riscontra nella frequenza di battimento generata da due microonde e che permane come un insieme di suoni di frequenza bassa quando si tenti di annullare la frequenza stessa facendo $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2 = 0$.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL RICEVITORE.

Accanto agli effetti delle forze elettromotrici periodicamente variabili devono tenersi presenti anche le fluttuazioni a lungo periodo e che generano staticamente una variazione della pulsazione kE se E è la variazione di tensione. È evidente che, poichè potrà garantirsi al più una stabilità dell'ordine del decimo di Volt su tensioni del centinaio di Volt non potrà prescindersi da variazioni della frequenza emessa dell'ordine di 10^5 p/s ammettendo per k il valore rilevato sperimentalmente nel nostro caso salvo quando con particolari accorgimenti, non sia possibile rendere più piccolo il valore di k .

Risulta da ciò che la realizzazione di un ricevitore a cambiamento di frequenza non è possibile praticamente che per frequenze largamente superiori all'ordine delle fluttuazioni, cioè che è necessario predisporre il cambiamento di frequenza sulla gamma delle onde corte; risulta inoltre malagevole, da quanto si è detto circa la spontanea modulazione dovuta al rumore di fondo, sfruttare il cambiamento di frequenza per la ricezione di microonde modulate in ampiezza in telefonia, in quanto verrebbero a sovrapporsi a tale modulazione le frequenze più basse ed intense dello stesso rumore di fondo.

Per la realizzazione invece di un ricevitore per telegrafia a microonde tale rumore di fondo è tollerabile e potrebbe anche essere sfruttato addirittura come frequenza modulante per la ricezione acustica. Occorrerà però prevedere una banda di passaggio del ricevitore eccezionalmente ampia e sufficiente ad assicurare la permanenza in essa della frequenza di battimento anche nelle più sfavorevoli condizioni di fluttuazione delle tensioni di alimentazione, con i nostri dati cioè non inferiore a 10^5 p/s. Si osservi però che l'allargamento della banda di ricezione porta un vantaggio illusorio sia perchè la sensibilità dell'amplificatore è limitata proprio dal rumore di fondo dello stesso, rumore che cresce con l'allargarsi della banda, sia perchè naturalmente diminuisce il coefficiente di risonanza dei vari circuiti di amplificazione e quindi l'amplificazione totale.

Per ridurre la larghezza della banda di passaggio e nello stesso tempo allontanare la instabilità di ricezione che ne conseguirebbe si è pensato d'introdurre come segnale di modulazione per la ricezione acustica una piccola modulazione di frequenza nel generatore locale di microonde del ricevitore, la quale esplica così anche l'ufficio di portare la frequenza di battimento sempre e per un tratto sufficientemente lungo del proprio periodo a cadere nell'interno della banda passante, e che effettivamente riesce, come risulta dall'esperienza fattane, a regolarizzare perfettamente l'oscillazione di battimento e la ricezione. Si ottengono con questo metodo i seguenti vantaggi:

regolando la larghezza della banda di modulazione di frequenza può stabilizzarsi nella misura necessaria ed a seconda delle condizioni momentanee di stabilità delle tensioni di alimentazione, l'oscillazione di battimento nei rapporti della banda passante del ricevitore;

detta banda passante può essere ristretta limitando in tal modo l'entità del rumore di fondo del ricevitore e permettendo di sfruttarne a fondo la sensibilità. Naturalmente in questo modo si determina una diminuzione dell'intervallo di tempo nel quale viene effettivamente immessa l'energia in arrivo nel ricevitore, tale diminuzione però può compensarsi aumentando convenientemente il segnale del generatore locale. In ogni caso regolando la larghezza della banda di modulazione di frequenza può ottenersi il giusto compromesso fra stabilità e sensibilità e può eventualmente spingersi quest'ultima, per esempio durante il periodo di ricerca dell'emissione lontana, anche a valori molto elevati, a scapito naturalmente della stabilità;

essendo sempre preponderante l'ampiezza della modulazione di frequenza introdotta rispetto a quella delle frequenze basse del rumore di fondo delle lampade generatrici quest'ultimo perde qualsiasi importanza nei riguardi della ricezione acustica;

infine la frequenza acustica con cui si esegue la modulazione di frequenza può essere scelta in modo da cadere nell'intorno della massima sensibilità dell'orecchio, e la nota che ne risulta riesce molto più gradevole ed efficiente per la ricezione del rumore irregolare prodotto dalla modulazione spontanea del rumore di fondo.

LA MODULAZIONE DI FREQUENZA NEL RICEVITORE.

Alfine di chiarire e giustificare il principio di funzionamento sopra esposto supponiamo che la modulazione di frequenza venga eseguita con una piccola tensione sinusoidale $e \cos \Omega t$ di ampiezza e e di frequenza acustica $\Omega/2\pi$ introdotta nell'oscillatore locale del ricevitore, od eventualmente nel trasmettitore. Con un procedimento perfettamente analogo a

quello già esposto si ottiene una oscillazione della forma $\cos(\alpha_1 - \alpha_2)$ in cui l'argomento $\alpha_1 - \alpha_2$ è espresso da

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \omega_0 t + \psi + \frac{ke}{\Omega} \sin \Omega t$$

dove si è supposto di poter considerare k costante nell'escursione effettuata dalla tensione modulatrice, ed avendo definito la pulsazione istantanea del battimento;

$$\omega = \frac{d(\alpha_1 - \alpha_2)}{dt} = \omega_0 + ke \cos \Omega t.$$

Ponendo $ke/\Omega = z$ e ricordando che

$$\cos(z \sin \Omega t) = J_0(z) + 2J_2(z) \cos 2\Omega t + 2J_4(z) \cos 4\Omega t + \dots$$

$$\sin(z \sin \Omega t) = 2J_1(z) \sin \Omega t + 2J_3(z) \sin 3\Omega t + 2J_5(z) \sin 5\Omega t + \dots$$

dove $J_n(z)$ è la funzione di BESSEL del primo tipo di argomento z ed ordine n , e che per n intero $J_n(z) = (-1)^n J_{-n}(z)$, tale oscillazione può svilupparsi nella forma

$$\cos(\alpha_1 - \alpha_2) = \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(z) \cos[(\omega_0 + n\Omega)t + \psi]$$

che rappresenta la banda di modulazione di frequenza dovuta alla frequenza acustica $\Omega/2\pi$ costituita di componenti fra loro a distanza Ω disposte ai lati della frequenza di battimento $\omega_0/2\pi$.

Per apprezzare le intensità delle varie componenti osserviamo che se per esempio $\omega_0/2\pi = 10^7$ p/s, prendendo per k il valore $k = 2\pi 10^6$ p/s per Volt ed applicando la tensione di modulazione di frequenza $\Omega/2\pi = 500$ p/s e di ampiezza $e = 0,1$ Volt quale appare conveniente per il nostro scopo, si ha $z = 200$; essendo l'argomento z grande potremo applicare per le funzioni di BESSEL gli sviluppi semiconvergenti

$$J_n(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \left\{ \cos\left(z - \frac{n\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \left[1 - \frac{(2^2 - 4n^2)(3^2 - 4n^2)}{1 \cdot 2 \cdot (8z)^2} + \dots \right] + \right. \\ \left. + \sin\left(z - \frac{n\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \left[\frac{1^2 - 4n^2}{1 \cdot 8z} - \dots \right] \right\}$$

validi finchè sia $|n|$ piccolo rispetto a z ; ciò equivale a dire che la grandezza della componente centrale, $n = 0$, e di quelle immediatamente attigue è dell'ordine di $\sqrt{2/\pi z}$, cioè con i nostri valori di 0,05. L'ampiezza delle componenti va in media crescendo via via che ci si allontana dal centro della banda, fino a raggiungersi la regione in cui $|n|$ è dello stesso ordine di z ; ad $|n| = z$ corrispondono le componenti di frequenza $\omega_0 \pm n\Omega = \omega_0 \pm ke$

cioè le frequenze istantanee approssimativamente massime e minime che si hanno per la variazione di frequenza determinata dalla modulazione. Al di là di questa regione l'ampiezza diminuisce rapidamente fino a ridursi asintoticamente nulla.

Una verifica sperimentale di quanto si è ora esposto è rappresentata dalle curve della figura 3 che dànno qualitativamente la forma della banda di modulazione di frequenza della frequenza di battimento fra due microonde; tali curve di cui ciascuna corrisponde ad un valore diverso dall'ampiezza della tensione di modulazione sono state ottenute esplorando con

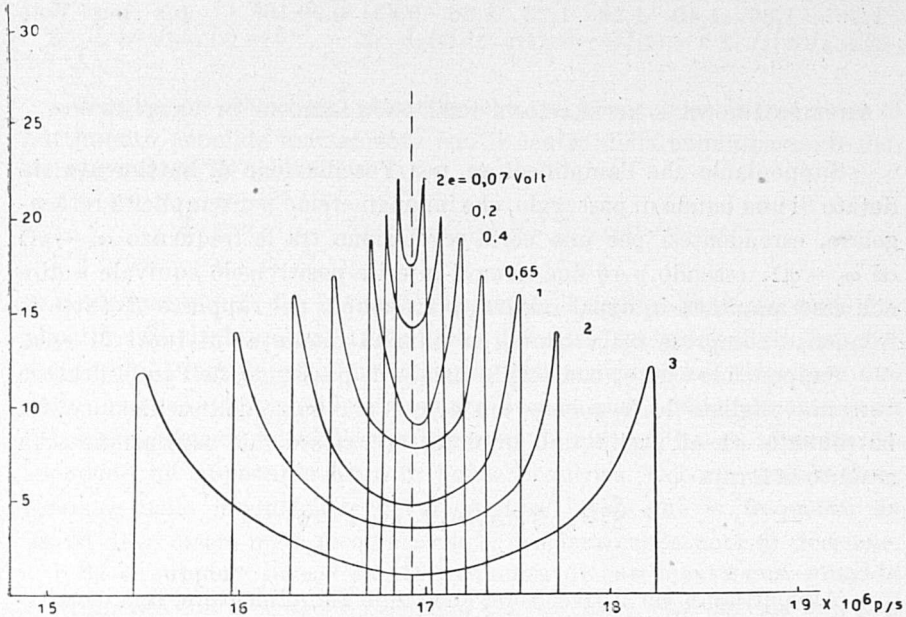


Fig. 3.

un ricevitore assai selettivo la banda di frequenza attorno alla frequenza del battimento; la lampada che veniva modulata è la B e le sue condizioni di alimentazione erano $V_p = 69$ Volt, $V_g = 245$ Volt, $I_g = 42$ miliamp. alle quali corrisponde come si rileva dalla figura 2 un valore $k/2\pi = 10^6$. Il battimento era ottenuto regolando la seconda lampada R in modo da avere $V_p = 70$ Volt, $V_g = 236$ Volt, $I_g = 58$ milliamp., da cui risulta, come può vedersi dalle caratteristiche di figura 1, una frequenza di battimento $\omega_0/2\pi = 16,9 \cdot 10^6$ p/s. Nel diagramma le ordinate sono proporzionali alla corrente rettificata della rivelatrice, ma naturalmente non alle ampiezze delle componenti ad alta frequenza a causa della distorsione di ampiezza introdotta nell'amplificazione. Nella tabella seguente sono riportate le ampiezze e della tensione di modulazione ed in corrispon-

denza la larghezza $\Delta\omega/2\pi$ della banda di modulazione di frequenza ottenuta, che dovrebbe risultare circa uguale a $2ke/2\pi$, ed infine i valori da essa dedotti con tale ipotesi per $k/2\pi$. Come si vede tali valori rimangono sensibilmente costanti e si accordano soddisfacentemente con quello ricavato dalla caratteristica statica, avuto anche riguardo della difficoltà di apprezzare con esattezza i limiti della banda, e dell'errore apportato dalla larghezza finita della banda di passaggio del ricevitore.

$2e = 0,07$	0,20	0,40	0,65	1,00	2,00	3,00	Volt
$\Delta\omega/2\pi = 0,13$	0,28	0,48	0,80	1,20	1,70	$2.70.10^6$	p/s
$k/2\pi = 1,86$	1,40	1,20	1,23	1,20	0,85	$0.90.10^6$	p/s per Volt

AMPLIFICAZIONE E RIVELAZIONE DELL'OSCILLAZIONE DI BATTIMENTO.

Supponiamo che l'amplificatore per l'oscillazione di battimento sia dotato di una banda di passaggio, che immagineremo per semplicità rettangolare, estendentesi per una certa regolazione tra le frequenze $\omega_0 - p\Omega$ ed $\omega_0 + q\Omega$, essendo p e q due numeri interi e positivi: ciò equivale a dire che esso amplifica in egual misura, per esempio nel rapporto K tutte le frequenze comprese nella banda ed elimina quelle al di fuori di essa.

Supponendo che ω_0 cada nella banda di passaggio dell'amplificatore verranno tagliate le frequenze più alte e più basse dell'oscillazione del battimento ed all'uscita dall'amplificatore stesso tale oscillazione avrà assunto la forma

$$K \sum_{-p}^q J_n(z) \cos [(\omega_0 + n\Omega)t + \psi]$$

Ammettiamo per il rivelatore, che segue l'amplificatore, una caratteristica per semplicità quadratica $i = a + bv + cv^2$, e che esso sia dotato di un conveniente filtro atto a lasciar passare le sole componenti di frequenza fonica. Si determinerà perciò in tale rivelatore una corrente della forma

$$a + bK \sum_{-p}^q J_n(z) \cos [(\omega_0 + n\Omega)t + \psi] + \\ + cK^2 \sum_{-p}^q \sum_{-p}^q J_l(z) J_m(z) \cos [(\omega_0 + l\Omega)t + \psi] \cos [(\omega_0 + m\Omega)t + \psi];$$

ogni termine dell'ultima somma può spezzarsi in due termini di pulsazioni $2\omega_0 + (l + m)\Omega$ e $(l - m)\Omega$, ma solo i termini di quest'ultimo tipo verranno trasmessi per l'amplificazione in bassa frequenza: la corrente utile sarà pertanto, prescindendo dal fattore cK^2 , della forma

$$\frac{1}{2} \sum_{-p}^q \sum_{-p}^q J_l(z) J_m(z) \cos (l - m)\Omega t;$$

dalla somma precedente possono staccarsi i termini per i quali sia $|l-m| = 1$, $|l-m| = 2$ ecc. e dai quali si deducono le ampiezze $|A_1|$, $|A_2|$ ecc., delle componenti di frequenza $\Omega/2\pi$, $2\Omega/2\pi$, ecc. Si trova precisamente che

$$A_1 = \sum_{-p+1}^q J_l(z) J_{l-1}(z) \quad , \quad A_2 = \sum_{-p+2}^q J_l(z) J_{l-2}(z).$$

Si deve osservare però che, se h e k sono due numeri interi tali che $h \geq 0$, $k \geq 2$, si ha $J_{-h}(z) J_{-(h+1)}(z) = -J_h(z) J_{h+1}(z)$, $J_{-h}(z) J_{-(h+2)}(z) = J_h(z) J_{h+2}(z)$ e quindi identicamente

$$\sum_{-k+1}^k J_l(z) J_{l-1}(z) = 0 \quad , \quad \sum_{-k+2}^k J_l(z) J_{l-2}(z) = -J_1^2(z) + 2 \sum_2^k J_l(z) J_{l-2}(z).$$

Risulta da ciò immediatamente che, se $p = q$, cioè la frequenza di battimento coincide esattamente con il centro della banda passante dell'amplificatore, si ha

$$A_1 = 0 \quad , \quad A_2 = -J_1^2(z) + 2 \sum_2^p J_l(z) J_{l-2}(z);$$

se ne deduce quindi che in queste condizioni il sistema funziona come duplicatore per la frequenza $\Omega/2\pi$ il che del resto era prevedibile dal momento che l'energia ad alta frequenza può penetrare nel ricevitore due volte ogni periodo $2\pi/\Omega$. La frequenza doppia non è naturalmente pura ma accompagnata da frequenze superiori da cui può essere separata disponendo un opportuno filtro in bassa frequenza. Occorre quindi tener presente nella modulazione del generatore locale che la frequenza da usarsi deve essere metà di quella che si desidera per la nota di ricezione.

Se si suppone invece che la frequenza di battimento non coincida esattamente con il centro della banda del ricevitore, cioè che sia $p \neq q$, si rileva che in A_1 appaiono alcuni termini diversi da zero, mentre in A_2 si spostano i soli termini corrispondenti alle frequenze estreme della banda, nell'intorno cioè di $\omega_0 - p\Omega$ e $\omega_0 + q\Omega$. Ciò equivale a dire che le eventuali piccole fluttuazioni delle tensioni di alimentazione hanno il minimo effetto sulla grandezza di A_2 mentre determinano il comparire nella corrente rivelata della componente fondamentale $\Omega/2\pi$.

Le conclusioni sopra esposte sono state confermate dall'esperienza: si riscontra infatti che, purchè la banda del ricevitore sia notevolmente più stretta di quella di modulazione, la ricezione diviene perfettamente stabile e praticamente indipendente dalle fluttuazioni di tensione di alimentazione che rendono così irregolare la ricezione diretta del battimento: inoltre si osserva che quando, aggiustando per esempio le tensioni del generatore locale, si porta la frequenza di battimento nel centro della banda del ricevitore la nota di ricezione diventa alta e pura, e la qualità stessa di essa è indizio di aver raggiunto le condizioni ottime di regolazione.

DESCRIZIONE DEL RICEVITORE.

Il ricevitore di cui ora è stato esposto il principio, è suscettibile di essere realizzato praticamente con modalità differenti: si esporrà qui di seguito perciò solo una descrizione sommaria della realizzazione eseguita e sperimentata dall'autore, e che ha permesso di raggiungere una sensibilità molto maggiore di quella dei comuni ricevitori a rivelazione diretta per microonde. L'apparecchio è costituito (fig. 4) di una lampada UC 16, funzionante come diodo a catodo virtuale, che costituisce l'elemento non lineare nel quale si opera la trasformazione della frequenza di circa $1,9 \cdot 10^9$ p/s delle microonde in arrivo raccolte dall'antennina della lampada stessa in una frequenza compresa tra 1 e $2 \cdot 10^7$ p/s, e cioè nella gamma delle onde corte. Il cambiamento di frequenza si effettua per combinazione con la microonda emessa da una oscillatrice locale, pure UC 16 posta in prossimità della prima, e la cui radiazione è modulata acusticamente in frequenza da apposito generatore costituito da un triodo 76. La oscillazione di battimento viene trasferita mediante accoppiamento ad impedenza capacità in un pentodo amplificatore 6D6 dal quale il battimento stesso passa nella mescolatrice 6L7 nella quale si opera un secondo cambiamento di frequenza alla frequenza di $4,7 \cdot 10^5$ p/s. L'oscillatore per il secondo cambiamento di frequenza è costituito da un triodo 76. Dalla mescolatrice si passa in uno stadio di amplificazione costituito da un pentodo 6D6 cui segue una valvola 75 che racchiude i diodi per la rivelazione ed il controllo automatico di volume, e che esegue la prima amplificazione a bassa frequenza. La valvola di uscita è costituita da un pentodo 6V6 a fascio elettronico che può erogare circa 4 Watt.

È opportuno osservare che è stato seguito il sistema del doppio cambiamento di frequenza, allo scopo di sfruttare al massimo per l'amplificazione la perfezione raggiunta dalla moderna tecnica dei radioricevitori per onde corte, mentre nella precedente trattazione si era per semplicità presupposto un solo cambiamento di frequenza. È ovvio che il secondo cambiamento di frequenza non modifica concettualmente la validità del ragionamento fatto in quanto trasporta per differenza tutta la banda di modulazione attorno ad una frequenza inferiore. È da notare solo che per la difficoltà di ottenere una banda molto ampia, dato anche il valore piuttosto basso della frequenza della seconda trasformazione, conviene mantenere l'ampiezza della banda passante del ricevitore attorno a $2 \cdot 10^4$ p/s, il che si può conseguire regolando opportunamente l'accordo dei vari circuiti di amplificazione, in modo da realizzare anche una forma della banda che si avvicini alla rettangolare. La regolazione della forma e della larghezza della banda però non è critica sia perchè, salvo le difficoltà di

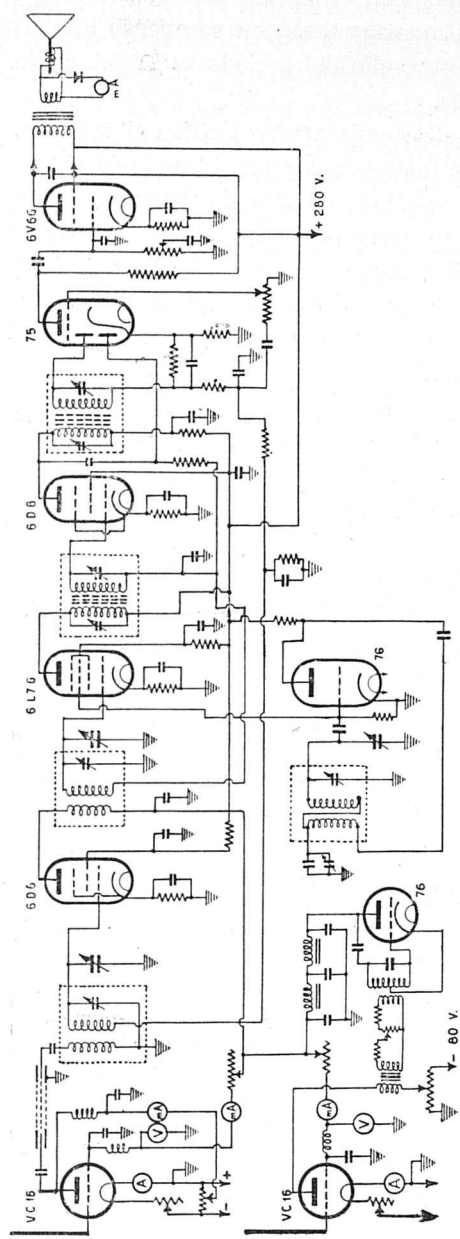


Fig. 4.

calcolo, può evidentemente estendersi la trattazione fatta anche ad una banda non rettangolare, sia perchè effettivamente il restringersi della banda passante porta come conseguenza un aumento del coefficiente di risonanza effettivo dei vari circuiti e quindi dell'amplificazione totale, realizzandosi così automaticamente un compenso alla perdita apportata dalla riduzione dell'intervallo del periodo $2\pi/\Omega$ nel quale viene immessa energia nel ricevitore.

Una difficoltà nella realizzazione pratica si incontra per l'alimentazione che deve essere fatta per il generatore locale di microonde e per la prima mescolatrice con batterie, al fine di conseguire la necessaria stabilità, dal momento anche che non è previsto in questo sistema alcun dispositivo per l'automatica stabilizzazione della frequenza; un'altra difficoltà è costituita dalla costruzione del generatore a frequenza acustica il quale deve esser tale da indurre nel generatore locale di microonde la sola tensione necessaria alla modulazione di frequenza, e che è in genere dell'ordine del decimo di Volt. A tale scopo occorre schermare il generatore a frequenza acustica ed aggiungere dal lato dell'alimentazione anodica un efficiente filtro di arresto. Dallo schema della fig. 4 appare tale filtro, e risulta anche il sistema seguito per introdurre in serie alla tensione dell'elettrodo frenante del generatore locale la tensione modulatrice, che viene abbassata per mezzo di trasformatori di rapporto elevato e resa finemente regolabile con apposito partitore a resistenza.

L'accoppiamento fra la mescolatrice per microonde ed il triodo a catodo virtuale che opera il primo cambiamento di frequenza è fatto direttamente disponendo le antenne delle due lampade prossime e parallele. La lampada oscillatrice locale è ricoperta da una spessa schermatura metallica cilindrica, munita di una fenditura regolabile, che serve al dosamento della radiazione indotta nel ricevitore, e nel contempo protegge la lampada dalle variazioni di frequenza per variazioni delle costanti dell'antenna apportate dallo spostamento eventuale degli oggetti circostanti. È da notare a questo proposito che anche la presenza dello schermo determina una notevole variazione della frequenza, ma che tale variazione può essere una volta per tutte compensata agendo sulle tensioni di alimentazione.

Il sistema ricevitore propriamente detto è costituito dalla lampada UC 16 mescolatrice che è situata sulla linea locale di un piccolo riflettore cilindrico parabolico, mentre l'oscillatrice locale contenuta nel suo schermo è situata una diecina di centimetri più avanti nel piano di simmetria passante per detta linea. Le due lampade sono collegate con il ricevitore da un cavo flessibile che convoglia le correnti di alimentazione e di modulazione, e che comprende anche un cavo per radio frequenza per la trasmissione della frequenza di battimento.

REGOLAZIONE E CARATTERISTICHE DI FUNZIONAMENTO DEL RICEVITORE.

La regolazione del ricevitore non offre difficoltà quando si siano determinate le condizioni di alimentazione dell'oscillatore locale per la produzione del battimento con la frequenza del trasmettitore. Durante tale determinazione è conveniente aumentare la sensibilità del ricevitore riducendo l'ampiezza della tensione modulatrice, salvo poi, a determinazione avvenuta, a riportarla al valore ottimo per una buona e stabile ricezione. È da notare che la variazione del potenziometro che regola detta ampiezza deve potersi eseguire molto finemente costituendo la base per il conseguimento delle condizioni di sensibilità e di stabilità ottime in ogni caso. È essenziale anche che la tensione di modulazione effettivamente immessa nell'oscillatore locale sia assai piccola, dell'ordine in genere del decimo di Volt.

Devesi inoltre osservare che dato che i triodi a campo frenante hanno caratteristica a resistenza negativa, può accadere l'innescarsi di oscillazioni su onda corta in corrispondenza a certe condizioni di alimentazione, oscillazioni che risultano modulate dalla frequenza acustica, e che possono venir ricevute direttamente dall'amplificatore. Tale oscillazione permane evidentemente anche in assenza della microonda del trasmettitore, ed ha frequenza costante in quanto questa dipende dalle costanti elettrodiche e del circuito della oscillatrice locale. Spostando la frequenza d'accordo dell'amplificatore del battimento è possibile eliminare pertanto questa causa di perturbazione.

La sensibilità conseguita con il ricevitore descritto è assai maggiore di quella ottenibile con i ricevitori a rivelazione diretta, muniti della consueta amplificazione a frequenza più bassa. Dato l'ordine delle frequenze in gioco non è possibile pensare ad un apprezzamento diretto della sensibilità del ricevitore, ma supponendo che, prescindendo dal cavo di raccordo, possa ammettersi per lo stadio di conversione un rendimento uguale ad uno, la sensibilità del sistema può ritenersi quella di un normale ricevitore per onde corte, e cioè dell'ordine di qualche microvolt applicato all'ingresso per ottenere l'uscita normale di bassa frequenza.

CONCLUSIONE.

Il sistema di trasmissione telegrafica con microonde realizzabile con il ricevitore descritto nel presente lavoro racchiude in sé i seguenti vantaggi:

1° *elimina la necessità della modulazione in ampiezza, difficile per queste frequenze, del trasmettitore; realizza per le microonde un sistema di ricezione con cambiamento di frequenza senza necessità di dispositivi di stabilizzazione né nel trasmettitore né nel ricevitore;*

2° rende possibile regolare la stabilità e la sensibilità durante la ricezione raggiungendo il miglior compromesso fra tali due fattori;

3° esegue una vera amplificazione del segnale in arrivo, sia pure indiretta avvalendosi dell'energia prodotta dall'oscillatore locale;

4° la frequenza di battimento può essere amplificata al massimo con i mezzi della moderna tecnica di amplificazione sulle onde corte;

5° viene eliminata l'influenza perturbante delle fluttuazioni spontanee delle tensioni di alimentazione: la modulazione per la ricezione acustica viene introdotta nel ricevitore e la nota può essere variata durante la ricezione;

6° si realizza infine una sensibilità assai più elevata di quella ottenibile con i ricevitori per microonde a rivelazione diretta.

La presente ricerca è stata eseguita presso l'Istituto Fisico della R. Università di Roma: hanno contribuito per i mezzi necessari anche l'Istituto Nazionale di Geofisica del Consiglio Nazionale delle Ricerche e la Direzione Generale PP. TT. del Ministero delle Comunicazioni.

RELAZIONE

approvata nell'Adunanza del 19 gennaio 1940-XVIII.

Il Dr. Zanotelli presenta un nuovo metodo di ricezione a cambiamento di frequenza per telegrafia con microonde che evita la modulazione del trasmettitore e realizza nel ricevitore un'amplificazione, sia pure indiretta, della radiazione captata facendola battere con una microonda prodotta localmente. Mentre i tentativi sinora eseguiti per la realizzazione della supereterodina a microonde avevano urtato nella difficoltà della stabilizzazione della frequenza di battimento, conseguente alla naturale instabilità dei generatori di microonde, con il metodo geniale proposto dall'autore si riporta periodicamente la frequenza di battimento a cadere nella banda di passaggio dell'amplificatore; ciò si consegue introducendo una piccola modulazione di frequenza nell'oscillatore locale del ricevitore, la quale esplica contemporaneamente anche l'ufficio di imprimere sulla frequenza di battimento la nota necessaria alla ricezione acustica.

Oltre alla evidente importanza pratica del risultato conseguito, che può aprire una nuova via alla tecnica delle trasmissioni con microonde, il lavoro appare scientificamente ben elaborato e completo, perchè l'autore analizza ampiamente e giustifica teoricamente il metodo proposto, mettendo così in luce alcuni punti assai interessanti del meccanismo di funzionamento.

La Commissione propone quindi la pubblicazione di questa Memoria negli Atti della R. Accademia d'Italia.

G. PESSON.

A. LO SURDO.