

[Complemento I](#)

CENT'ANNI DI RADAR

di Gaspare Galati

MISURA DI DISTANZE PER MEZZO DI
ONDE ULTRACORTE (RADIOTELEMETRIA)

ESTRATTO DA "ALTA FREQUENZA"
TORINO – MAGGIO 1939-XVII

DI

UGO TIBERIO

R. ISTITUTO ELETTROTECNICO E DELLE COMUNICAZIONI DELLA MARINA
R. ACCADEMIA NAVALE - LIVORNO

UGO TIBERIO

MISURA DI DISTANZE PER MEZZO DI
ONDE ULTRACORTE (RADIOTELEMETRIA)

●
Estratto da "ALTA FREQUENZA",
Torino - Maggio 1939-XVII

●
ACCAME - TORINO

MISURA DI DISTANZE PER MEZZO DI ONDE ULTRACORTE (RADIOTELEMETRIA)

UGO TIBERIO

Nella propagazione delle onde ultracorte e delle microonde hanno grande importanza i fenomeni di riflessione e di diffrazione provocati dal suolo e dagli ostacoli, per cui l'onda che raggiunge il ricevitore risulta in generale da più componenti che percorrono vie diverse. Oltre che per gli studi di propagazione, le misure sulle onde riflesse e diffratte hanno importanza anche per la navigazione marittima ed aerea, perchè su di esse è possibile fondare metodi per la rivelazione degli ostacoli, per la misura precisa delle distanze e per determinazioni assai rigorose di velocità istantanea.

In relazione a tali problemi è stato studiato un apparecchio, costituito da un trasmettitore e da un ricevitore abbinati, il quale permette la rivelazione degli echi elettromagnetici con elevata sensibilità, consente di selezionare anche echi molto vicini tra loro e converte in misura di frequenza la misura delle distanze e delle velocità. Il metodo è derivato dal classico procedimento per variazione lineare di frequenza, in uso in alcuni misuratori acustici (ululatori) e adoperato in radiotecnica per determinare l'altezza degli strati ionizzati. La variazione lineare di frequenza del trasmettitore e nella prima eterodina di conversione del ricevitore è ottenuta mediante condensatori speciali, tenuti in rotazione continua da motorini a velocità costante comandati in sincronismo. La presenza degli echi è denunciata da note di battimento di ordine acustico, le quali nascono da interferenza fra le onde riflesse e l'onda diretta; misurando la frequenza di ciascuna nota, per mezzo di un analizzatore d'onda, si determina la distanza del corrispondente ostacolo riflettente.

In questo articolo è esposta la teoria generale del metodo, con le considerazioni che hanno condotto alla scelta di esso e con i calcoli eseguiti per determinare l'entità pratica degli echi. In articoli successivi si riferiranno altre considerazioni teoriche particolari, lo schema e la descrizione tecnica dell'apparato ed alcuni risultati sperimentali.

La discussione teorica ed i risultati mostrano che le possibilità del metodo sono assai interessanti sia nelle ricerche sulla propagazione, sia nel campo della radiotelemetria navale ed aerea.

1. - Premessa.

Alla conoscenza dei fenomeni, che accompagnano la propagazione delle onde lunghe, medie e corte, hanno apportato un contributo decisivo gli apparecchi per la misura dell'altezza degli strati riflettenti dell'alta atmosfera, ai quali è dedicata una larga parte della letteratura scientifica che tratta di propagazione ⁽¹⁾. Potrebbe invece sorgere il dubbio, che l'interesse di questi apparecchi venga a cessare, allorchè dalle onde corte si passa alle ultracorte che non sono sistematicamente riflesse dagli strati ionizzati, dato che nelle pubblicazioni riguardanti la propagazione delle onde ultracorte non si trovano descritti dispositivi del genere ⁽²⁾.

In realtà i fenomeni di rifrazione e riflessione hanno anche nel campo delle onde ultracorte una importanza fondamentale. Il campo elettromagnetico utilizzato in pratica nella ricezione di queste onde è infatti notoriamente somma dei campi parziali dovuti ad un gran numero di raggi percorrenti vie diverse, ed è questa la causa alla quale si attribuiscono molti dei disturbi che si producono nella ricezione televisiva. Così è noto agli sperimentatori, ad esempio, che basta il passaggio di un aeroplano, di un'automobile, o anche semplicemente di una persona, in vicinanza di un ricevitore, per produrre, nella gamma d'onda sotto i cinque metri, marcati effetti di evanescenza.

-
- ⁽¹⁾ Vedansi, ad esempio:
S. S. KIRBY, L. V. BERKNER a. D. M. STUART: Proc. I. R. E., 1934, XXII, p. 481.
F. E. TERMAN: Measurements in radio engineering - McGraw-Hill, New York a. London, 1935, p. 266.
- ⁽²⁾ Ecco un elenco dei principali lavori su questo argomento:
T. L. ECKERSLEY: Proc. I. R. E., 1930, XVIII, p. 106.
A. ESAU a. W. M. HAHNEMANN: Proc. I. R. E., 1930, XVIII, p. 471.
L. F. JONES: Proc. I. R. E., 1933, XXI, p. 349.
B. TREVOR a. P. S. CARTER: Proc. I. R. E., 1933, XXI, p. 387.
J. C. SCHELLENG, C. R. BURROWS a. E. B. FERREL: Proc. I. R. E., 1933, XXI, p. 427.
C. R. ENGLUND, A. B. CRAWFORD a. W. W. MUMFORD: Proc. I. R. E., 1933, XXI, p. 464.
C. B. FELDMAN: Proc. I. R. E., 1933, XXI, p. 764.
C. R. BURROWS, A. DECINO a. L. E. HUND: Proc. I. R. E., 1935, XXIII, p. 1507.
P. VON HANDEL u. W. PFISTER: H. F. Techn. u. El. Ak., 1936, XLVII, p. 182.
R. S. HOLMES a. A. H. TURNER: Proc. I. R. E., 1936, XXIV, p. 755.
W. OCHMANN u. H. PLENDL: H. F. Techn. u. El. Ak., 1938, LII, p. 37.
G. ECKART u. H. PLENDL: H. F. Techn. u. El. Ak., 1938, LII, p. 44.
G. ECKART: H. F. Techn. u. El. Ak., 1938, LII, p. 58.
A. LO SURDO, E. MEDI e G. ZANOTELLI: Ricerca Scientifica, 1938, IX-I, p. 475.

Il problema di determinare il numero e la lunghezza di questi raggi è certamente meno semplice di quello che si presenta nella gamma delle onde medie, ove gli ostacoli riflettenti che interessano sono gli strati ionizzati, assai facili a rilevarsi perchè pochi in numero, distanti ed aventi alta efficacia di riflessione. Nel caso nostro, per contro, gli ostacoli interessanti sono numerosi e vicini e portano ciascuno un contributo relativamente piccolo alla formazione del campo risultante. Vi sono però casi in cui la questione si presenta con relativa semplicità; ciò accade, ad esempio, quando la propagazione si svolge sul mare aperto e calmo, e gli echi provengono solo dalle coste e dagli ostacoli compresi nei limiti di portata.

Ai motivi di interesse puramente scientifico, inerenti allo studio della propagazione, il problema ne affianca altri di carattere tecnico, di grande importanza. Sono infatti noti i tentativi, che si vanno compiendo, per valersi delle onde riflesse al fine di rivelare gli ostacoli nella navigazione (3). In questi tentativi i ricercatori si sono sempre preoccupati di fare in modo che il fascio delle onde trasmesse fosse il più ristretto possibile, così da investire un solo ostacolo per volta, e di evitare che il segnale potesse giungere al ricevitore per altra via oltre quella del raggio riflesso. Questa preoccupazione ha condotto ad adoperare a tal fine sempre microonde sui 15 cm, che si possono far convergere in fasci così stretti, da essere utilizzabili con scopi e con tecnica affini a quelli dei classici rivelatori di ostacoli a raggi infrarossi. Si va così incontro all'inconveniente di dover esplorare soltanto una zona molto ristretta per ogni posizione dei proiettori, e di dover impiegare potenze piccole in trasmissione e rivelatori di sensibilità assai inferiore a quella che è possibile raggiungere nei ricevitori per onde lunghe. Per svincolarsi da queste limitazioni, occorre studiare il problema di rivelare insieme, con la possibilità di selezionarli, un numero rilevante di echi a breve ritardo e di intensità molto piccola.

Con lo scopo di esaminare sperimentalmente tale questione sia dal punto di vista scientifico sia da quello tecnico, si è studiato, da vari anni, un metodo per la rivelazione e per l'esame degli echi a breve distanza su onde ultracorte e, dopo alcune esperienze preliminari, si è costruito a tal fine un apparato, che è ora in corso di prova.

Nel presente lavoro si riferiscono le principali considerazioni che hanno condotto a concretare il metodo, e di questo si dà una schematica descrizione. Articoli successivi tratteranno della costruzione dell'apparecchio e di alcune questioni che ad essa si connettono, delle esperienze preliminari e del programma sperimentale.

(1) Rivelatore di ostacoli S. F. R. D 16 a microonde - A. F., 1936, V, p. 314.

C. W. RICE: G. E. R., 1936, XXXIX, p. 363.

2. - Confronto fra il metodo degli impulsi e quello per variazione di frequenza. Metodo adottato.

Per quella che potrebbe chiamarsi la « radiotelemetria » degli strati ionizzati dell'alta atmosfera, vengono adoperati due metodi, ispirati ambedue dalla cura di eliminare, nella rivelazione delle onde riflesse, l'effetto mascheratore che su di esse esercita l'onda diretta, la quale è normalmente assai più intensa.

Il primo consiste ⁽⁴⁾ nel trasmettere impulsi di breve durata, in modo che non vi sia più onda diretta allorchè giungono le riflesse, così che queste vengono rivelate da sole. Il secondo ⁽⁵⁾ consiste nel variare, con continuità e con legge lineare, la frequenza del trasmettitore; le differenze fra i ritardi, con cui l'onda diretta e le varie onde riflesse giungono al ricevitore, si traducono in altrettante differenze tra le frequenze; gli echi vengono così rivelati per battimenti con l'onda diretta, i quali si traducono in variazioni di ampiezza e fase rilevabili acusticamente o all'oscillografo.

Nell'avviare la presente ricerca, si sono esaminate con attenzione le possibilità di questi due metodi in relazione al problema che interessa,

e si è giunti alla conclusione che conviene meglio il secondo, perfezionato in relazione alle nuove esigenze, al contrario di quel che accade nelle ricerche sull'alta atmosfera, per le quali è risultato più conveniente il metodo degli impulsi.

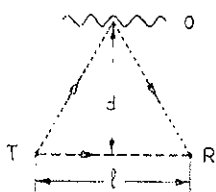


Fig. 1. — Interferenza tra raggio riflesso e diretto in presenza di un ostacolo.

La stratosfera è infatti un mezzo essenzialmente dispersivo, per cui la distanza della superficie equivalente di riflessione varia con la frequenza. Questo fatto costringe, affinché la grandezza da misurare non abbia a variare troppo durante la misura, a limitare la variazione di frequenza entro una banda molto ristretta, e ciò rende il metodo di impiego difficile e fa sì che i risultati siano

di interpretazione poco chiara. Tale difficoltà scompare nella telemetria di ostacoli, dato che la dispersività del mezzo è trascurabile. Altri vantaggi assai notevoli si hanno, inoltre, per effetto dell'elevato valore delle frequenze in gioco.

Allo scopo di precisare questa considerazione, riferiamoci (fig. 1) ad un ricevitore *R* che riceva una trasmissione di frequenza variabile (pulsazione ω) inviata dal trasmettitore *T* in presenza di un ostacolo *O*.

⁽⁴⁾ G. BREIT a. M. A. TUVE: Phys. Rev., 1926, XXVIII, p. 554.

I. RANZI: Nuovo Cimento, 1931, VIII, p. 98.

J. P. SCHAFER a. W. M. GOODALL: Proc. I. R. E., 1932, XX, p. 1131.

⁽⁵⁾ E. V. APPLETON: Proc. Phys. Soc., 1928, XLI, p. 43.

A. L. GREEN: Proc. I. R. E., 1934, XXII, p. 324.

Come è noto dall'acustica ⁽⁶⁾, ove sorgenti a frequenza variabile sono di uso corrente nelle misure, e dai lavori sulle sonde atmosferiche citati nella nota ⁽⁵⁾, si ha in tal caso in R un effetto di interferenza tra il raggio riflesso proveniente da O e quello diretto che giunge da T per la via più breve. Il fenomeno diviene particolarmente semplice se la frequenza di T cresce o diminuisce con continuità e con legge lineare; la differenza di fase istantanea fra i due campi, incidenti in R , è infatti:

$$\varphi_{(t)} = \omega_{(t)} (\tau'' - \tau'),$$

essendo τ' e τ'' i tempi impiegati dal segnale a giungere da T ad R per le due vie; detta c la velocità di propagazione, supposta per semplicità eguale lungo i due percorsi, si ha con le notazioni della figura 1:

$$\varphi_{(t)} = \omega_{(t)} \frac{\sqrt{4d^2 + l^2} - l}{c} = 2\pi \frac{\sqrt{4d^2 + l^2} - l}{\lambda_{(t)}}.$$

Avendo supposto che $\omega_{(t)}$ vari linearmente nel tempo, $\frac{\partial \omega_{(t)}}{\partial t} = A =$
 $=$ costante, per cui:

$$[I] \quad \frac{\partial \varphi_{(t)}}{\partial t} = A \frac{\sqrt{4d^2 + l^2} - l}{c}.$$

Il vettore rappresentativo del campo in R risulta dunque dalla composizione di due vettori, di cui uno anticipa, o ritarda, continuamente di fase rispetto all'altro, determinando battimenti la cui frequenza angolare è:

$$\Omega = \frac{\partial \varphi_{(t)}}{\partial t}.$$

Essendo A ed l dati dell'esperienza, si può, misurando Ω , ricavare la distanza d dell'ostacolo.

Nella radiotelemetria degli alti strati, i numeri tipici in gioco sono $d = 100$ km, $l = 100$ km e, valore medio di $\omega_{(t)}$, $\omega_m = 30 \cdot 10^6$ rad/s (onda intorno ai 60 m). Per evitare che intervengano effetti di dispersione, ed anche per fare sì che la frequenza non oltrepassi i limiti imposti dalla banda del ricevitore, del quale non sarebbe agevole far variare l'accordo in sincronismo col trasmettitore, l'intervallo di variazione della frequenza è limitato a 20 kHz; la durata di ogni variazione è di 3 s, per cui si ha:

$$\frac{\partial \omega_{(t)}}{\partial t} = A = 2\pi \frac{20 \cdot 10^3}{3} = 4,2 \cdot 10^4 \text{ rad/s}^2.$$

⁽⁶⁾ Per i fenomeni di interferenza prodotti da suoni « ululati » si confronta: Handbuch der Experimental Physik, XVII, Technische Akustik, I - Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1934; e più specialmente: J. BRILLOUIN: R. G. E., 1936, XI, p. 434.

Introducendo tali valori di A , l , d nella [1], si ricava $\Omega = 17$ rad/s. Il numero dei battimenti, nella durata di ciascuna variazione di frequenza, risulta di 8.

Si vede subito come con un gruppo di cifre di tal genere non sia agevole ottenere una misura precisa della distanza. La piccolezza del numero dei periodi di battimento per secondo fa invero sì che non si possa contarli con grande precisione; inoltre, perchè i battimenti siano chiaramente rivelabili, sia per via acustica con l'aiuto di una nota di supporto, sia per via ottica all'oscillografo, è necessario che i campi interferenti non presentino diverso ordine di grandezza. Da questa seconda circostanza consegue che non si può collocare il ricevitore vicino al trasmettitore, altrimenti l'onda diretta risulterebbe troppo più forte della riflessa, e che è indispensabile avere un segnale riflesso di intensità tale da superare largamente il rumore di fondo.

Nel caso delle onde ultracorte, questo gruppo di cifre cambia in modo da risultare assai più favorevole. Infatti, gli ostacoli riflettenti ed i percorsi elettromagnetici con cui si ha a che fare non danno luogo, nella maggior parte dei casi, ad effetto dispersivo e questo effetto, anche là dove si manifesta, non è in genere tale da imporre limitazioni molto severe; tanto più che esso è essenzialmente dominato dalla lunghezza d'onda, poichè le variazioni assolute di frequenza, delle quali si ha bisogno, si traducono in questa gamma in variazioni percentuali relativamente piccole. Supponiamo, per fissare le idee, che si tratti di eseguire misure con l'onda di 1,50 m: una variazione di $2 \div 3$ cm sull'onda non introduce dispersione apprezzabile, per cui è perfettamente lecita una variazione di frequenza ampia 3 MHz. Se tale variazione viene ripetuta 10 volte per secondo, posto che l'ostacolo sia alla distanza $d = 5000$ m, e che l sia trascurabile in confronto a d , si ha:

$$\frac{\partial \omega_{10}}{\partial t} = 1,88 \cdot 10^8 \text{ rad/s}^2.$$

$$\Omega = 6280 \text{ rad/s},$$

per cui la frequenza di battimento è 1000 Hz.

Il fatto che i battimenti si succedano a frequenza udibile produce due importantissimi vantaggi. In primo luogo ci si libera dalla limitazione di dover operare con raggi riflesso e diretto di intensità dello stesso ordine; si tratta infatti di un vero e proprio effetto di eterodina fra raggio riflesso e diretto, per cui il primo può essere assai più debole del secondo; anzi la presenza sul rivelatore di una tensione di onda diretta piuttosto forte può agevolare la rettificazione. La sensibilità sale fortemente e diviene dello stesso ordine di quella che si raggiunge nella ricezione telegrafica per eterodina. Il raggio riflesso da rivelare può dunque essere di ampiezza anche minore di quella che corrisponde al livello del rumore di fondo, dato che da questo l'orecchio può separare facil-

mente una nota acustica. Così, nelle sonde radioatmosferiche per variazione di frequenza, essendovi, come abbiamo visto innanzi, due o tre battimenti al secondo, occorre che il campo riflesso sia almeno tale da fornire da $100 \mu\text{V}$ ad 1 mV sulla prima griglia del ricevitore, affinché sia possibile, con l'aiuto dell'oscillografo o ad orecchio, contare con sicurezza i massimi: laddove, nel caso di una ricezione di tipo telegrafico, può bastare $1 \mu\text{V}$.

Il secondo vantaggio sta nel fatto che ostacoli a distanze diverse danno luogo a frequenze diverse, le quali possono agevolmente essere discriminate per mezzo di un analizzatore d'onda. Nella telemetria degli alti strati ciò non è possibile, perchè il numero dei battimenti per ogni ciclo della variazione di frequenza è troppo piccolo.

Nell'esempio considerato avanti, abbiamo trovato infatti, per la sonda atmosferica, 8 periodi per ogni semiciclo della modulazione di frequenza, laddove nel caso delle onde ultracorte il numero corrispondente, nell'esempio riferito, è risultato di 100 periodi, assai più favorevole per l'analisi, come è intuitivo a priori e come vedremo del resto meglio più oltre.

Esaminate così le possibilità del metodo per variazione, perfezionato « accelerandolo » nel modo che si è visto, passiamo ad analizzare quelle del dispositivo ad impulsi, le quali sembrano invece peggiorare nel nuovo campo di applicazione.

Il primo e ben noto inconveniente del telemetro ad impulsi sta nel fatto che esso deve funzionare per una frazione molto limitata del tempo. È chiaro infatti che, per poter esaminare con comodità gli echi, non bisogna trasmettere un nuovo impulso se non si sono prima ricevuti tutti gli echi dovuti all'impulso precedente. Ora nel caso nostro interessano normalmente echi provenienti da ostacoli distanti fino a 30 km, ed a tale distanza corrisponde un ritardo di $2 \cdot 10^{-4}$ s; gli impulsi trasmessi dovrebbero quindi praticamente succedersi a non meno di $3 \cdot 10^{-4}$ s l'uno dall'altro. Se la durata di ciascun impulso è di $3 \cdot 10^{-7}$ s, risulta che il trasmettitore funziona per un millesimo del tempo; per cui solo un millesimo della potenza di cui è capace viene messa in gioco. Nel telemetro per variazione di frequenza invece il funzionamento è continuo e sempre a piena potenza, ed è appunto ciò che consente all'orecchio di selezionare i segnali dal rumore di fondo, anche se il livello di questo ne soverchia l'ampiezza.

Segue da tale circostanza, che soltanto echi di intensità notevole possono essere rivelati. Ed infatti, una successione di impulsi risulta chiaramente esaminabile all'oscillografo solo se l'ampiezza è largamente superiore al livello del rumore, e quindi praticamente dell'ordine di almeno $100 \mu\text{V}$ sulla prima griglia, laddove nella ricezione acustica per battimenti si può scendere ad $1 \mu\text{V}$. Questa considerazione non ha importanza nella telemetria atmosferica, poichè gli strati hanno normalmente tale estensione, da dar luogo ad echi assai intensi, mentre nel nostro caso si ha a che fare con ostacoli in genere relativamente piccoli.

A diminuire le possibilità del dispositivo ad impulsi contribuisce, oltre al fatto che è molto difficile produrre impulsi di durata dell'ordine di 10^{-7} s, anche la circostanza che per ricevere distintamente echi succedentisi a brevi intervalli, occorre amplificare in ricezione uno spettro assai ingente di frequenze, il quale oltrepassa i limiti della banda ottenibile praticamente in un ricevitore anche speciale.

Supponiamo, per fissare le idee, che si tratti di esaminare echi provenienti da vari ostacoli e distanze diverse, e si debbano poter analizzare differenze di distanza dell'ordine di 100 m. Costruire lo spettro delle frequenze nell'ipotesi di echi succedentisi ad intervalli irregolari è cosa complicata; ma per la nostra discussione basta considerare il

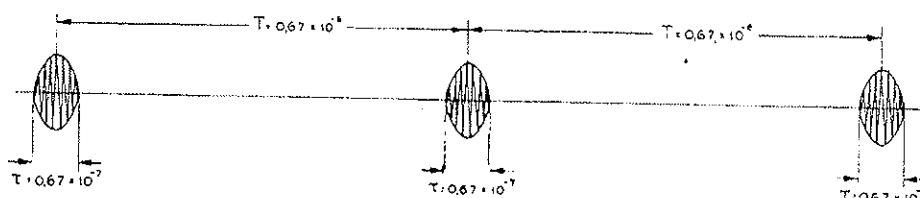


Fig. 2. — Rappresentazione schematica di una successione regolare di echi impulsivi: i tempi sono indicati in secondi.

caso semplice di echi giungenti ad intervallo costante. Con la supposta differenza di distanza di 100 m, tale intervallo risulta $T = 0,67 \cdot 10^{-6}$ s.

Per semplificare ulteriormente la discussione, ammettiamo che gli echi abbiano forma di segmenti di sinusoidi, e che il periodo di tale sinusoidi eguagli l'intervallo T fra gli echi. Ne risulta una successione del tipo disegnato nella figura 2, nella quale la durata τ di ciascun impulso è supposta piccola rispetto a T , e precisamente $\frac{1}{10} T$, affinché la posizione relativa degli impulsi risulti chiaramente individuabile.

Ci siamo in tal modo ricondotti ad una forma di modulazione relativamente semplice, analizzabile con l'aiuto delle cognizioni abituali. Detti T l'intervallo fra gli echi, τ la loro durata, v l'ampiezza della oscillazione ad alta frequenza all'istante t , V il valor massimo di tale ampiezza,

e posti $\Omega = \frac{2\pi}{T}$, $\theta = 2\pi \frac{\tau}{T}$, si ha:

$$v = \frac{V}{1 - \cos \theta} (\cos \Omega t - \cos \theta),$$

la quale esprime la legge di variazione dell'ampiezza nel corso di ciascun impulso, limitatamente alla durata di esso, con l'origine dei tempi al centro dell'impulso medesimo.

Da questa espressione, nell'ipotesi che gl'impulsi, oltre ad essere tutti identici, contengano anche ciascuno un numero assai grande di

periodi dell'onda ultracorta, è lecito ricavare le ampiezze approssimative delle onde che compongono lo spettro, col procedimento ben noto, seguito per gli impulsi di corrente degli amplificatori di classe C. Lo sviluppo mostra l'esistenza di un'onda portante di ampiezza:

$$V_0 = V \frac{\text{sen } \theta - \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta},$$

e di uno spettro assai esteso di onde laterali, corrispondenti alle varie armoniche dell'involuppo di modulazione, molte delle quali hanno ampiezza quasi eguale a quella della portante (7). Nella figura 3 è riportato uno spettro, calcolato sui dati numerici di figura 2, esteso fino alla quinta

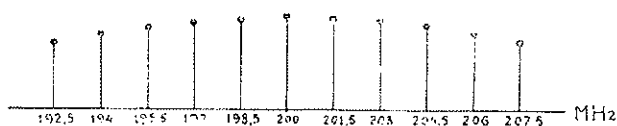


Fig. 3. — Spettro di una successione di impulsi, su onda portante di 1,5 m, limitato alla quinta armonica dell'involuppo di modulazione: valori di T e τ come nella figura 2.

armonica. Si vede come il numero di righe necessario per una rappresentazione fedele sia elevatissimo e come, anche limitandosi alle prime cinque armoniche (il che dà luogo ad una oscillogramma piuttosto grossolano, sul quale è difficile individuare la posizione esatta degli impulsi), si abbia già un'estensione di ben $6 \div 7$ MHz. Allo stato attuale, non si vede la possibilità di costruire un amplificatore a media frequenza capace di trattare una banda così estesa.

Da studi svolti in relazione ai ricevitori per microonde, risulta che si può, costruendo con cura i filtri di banda, e adoperando frequenze assai alte per l'amplificatore a media frequenza, ottenere una banda passante larga fino a 2 MHz. Partendo da questo dato, e facendo a ritroso il ragionamento precedente, si trova il minimo intervallo fra gli echi compatibile con un chiaro esame oscillografico di essi. Tale intervallo risulta dell'ordine di $3 \cdot 10^{-6}$ s, per cui la differenza di distanza fra gli ostacoli dovrebbe non scendere al disotto di 450 m.

Col metodo per variazione di frequenza è invece possibile raggiungere un « potere separatore » più elevato. L'analisi dello spettro fornito

(7) Sviluppi in serie di questo genere sono riportati in:

A. MARINO: A. F., 1934, III, p. 541.

U. RUELLE: A. F., 1935, IV, p. 688.

C. MATTEINI: A. F., 1936, V, p. 68 e 180.

In: F. E. TERMAN: Radio Engineering - McGraw-Hill, New York a. London, 1937, p. 340, è riportato un grafico, con le armoniche calcolate in funzione di θ .

dal ricevitore in bassa frequenza può infatti teoricamente spingersi, con l'aiuto degli analizzatori a quarzo, fino a separare righe distanti alcuni hertz. Con i dati, che abbiamo preso avanti come riferimento nell'esame del metodo per variazione di frequenza, risulta che ad una differenza di distanza di 50 m corrisponde una differenza di frequenza di 10 Hz chiaramente apprezzabile.

In un lavoro di prossima pubblicazione ci si riserva di mostrare come in pratica s'incontrino difficoltà, che non permettono di spingere il « potere separatore » e la sensibilità dell'apparecchio fino a quel limite, che a prima vista può sembrare raggiungibile. Alle note di battimento utili è infatti sovrapposta inevitabilmente un'oscillazione a frequenza fondamentale molto bassa, derivante dalla variazione periodica di frequenza, che possiede numerose e forti armoniche, le quali disturbano la ricezione.

Per mettere fin da ora in rilievo tale circostanza, osserviamo che il diagramma di modulazione di frequenza, che le considerazioni precedenti ci hanno condotto ad adottare, è costituito da una spezzata del tipo disegnato nella figura 4. Le variazioni brusche di frequenza, che

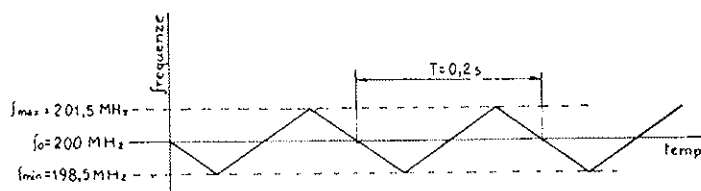


Fig. 4. --- Forma a spezzata della modulazione di frequenza in un radiotelemetro.

si verificano sulle cuspidi, si traducono in variazioni brusche di ampiezza del segnale rivelato. Con i dati numerici dell'esempio avanti trattato, riportati nella figura stessa, si deduce, per questa inevitabile modulazione disturbatrice, una frequenza fondamentale di 5 Hz. Per quanto si cerchi di arrotondare le cuspidi, sagomando opportunamente le lamine del condensatore rotante che produce la modulazione, questa fondamentale a 5 Hz risulta sempre accompagnata da molte armoniche. D'altra parte, l'ampiezza dell'oscillazione disturbatrice è assai elevata in confronto alle note utili, essendo essa portata anche dall'onda diretta che è normalmente molto più intensa delle riflesse. Ne segue che, pur con l'aiuto di un buon filtro passa-alto inserito sulla bassa frequenza, non si riesce ad eliminare del tutto il disturbo, al quale bisogna aggiungere altri rumori, derivanti anch'essi dalla grande intensità dell'onda diretta e dalla variazione di frequenza. Quando si tratta di rivelare echi deboli, è necessario fare molto affidamento sul potere separatore dell'udito.

3. - Considerazioni sulla entità pratica delle onde riflesse.

La conoscenza di questo dato è di fondamentale importanza per il nostro problema, poichè da esso dipende l'amplificazione che occorre attuare nella parte a media frequenza del ricevitore, per ottenere una rivelazione chiara degli echi. Siccome nella letteratura riguardante la propagazione delle onde ultracorte, già citata nella nota ⁽²⁾, non è trattata tale questione, è utile riferire alcuni calcoli ed alcuni dati sperimentali.

Gli elementi riflettenti, con cui ci s'incontra nella pratica, sono troppo svariati ed irregolari perchè sia possibile dare regole generali precise per il calcolo della potenza riflessa. Dobbiamo perciò contentarci di riferire i risultati, che si ricavano in relazione ad alcuni casi semplici, schematizzati in modo tale da poterli sottoporre a calcolo.

Dividiamo gli ostacoli riflettenti in tre categorie: una prima, degli elementi lineari, come le aste, i fili e simili; una seconda, dei riflettori piani; ed una terza, di tutti quegli ostacoli, nei quali non è possibile individuare una qualche regolarità, come ammassi di fili e di elementi piani.

Un filo rettilineo, investito da un campo elettromagnetico di lunghezza d'onda λ , possiede, se è lungo $\frac{\lambda}{2}$ e parallelo al vettore elettrico, una « lunghezza efficace » $l_e = \frac{\lambda}{\pi}$, ed una resistenza di circa 73Ω , posto che, come è generalmente ammissibile, non vi sia altra causa di dissipazione oltre l'irradiazione.

Si ha quindi, indicando con F' il valore efficace del campo elettrico e con I quello della corrente nel punto di mezzo del filo:

$$I = \frac{F' \lambda}{73 \pi}$$

La potenza, che il filo assorbe dal campo, è:

$$73 I^2 = \frac{F'^2 \lambda^2}{73 \pi^2}$$

Tale potenza viene reirradiata circolarmente, ed una parte di essa giunge al ricevitore. La forza cimomotrice E ⁽⁸⁾ così assunta dal filo è approssimativamente ⁽⁹⁾:

⁽⁸⁾ Per la definizione della forza cimomotrice si veda: L. SACCO e U. TIBERIO: Sul modo di esporre e di impiegare i dati di irradiazione e propagazione - A. F., 1935, IV, p. 668.

⁽⁹⁾ La lunghezza efficace l_e non è invero molto piccola rispetto a λ , come sarebbe necessario per poter applicare la formula del dipolo con rigore. L'errore che si commette è però piccolo.

$$E = 377 \frac{l_e I}{\lambda} = \frac{377 F' \lambda}{73 \pi^2} = 0,52 F' \lambda.$$

Supponiamo ora che il trasmettitore ed il ricevitore siano abbinati ⁽¹⁰⁾, e che nel percorso elettromagnetico, che va da essi all'elemento riflettente, non vi sia altra causa di attenuazione del campo oltre quella che deriva dalla propagazione sferica. Detta E' la forza cimomotrice che l'aereo trasmettente ha nella direzione dell'elemento, e d la distanza, si ha:

$$F' = \frac{E'}{d},$$

per cui:

$$E = 0,52 \frac{E' \lambda}{d}.$$

Siccome il filo reirradia circolarmente la potenza assorbita, il campo F da esso prodotto sull'aereo ricevente è:

$$[2] \quad F = \frac{E}{d} = 0,52 \frac{E' \lambda}{d^2}.$$

Con un'onda di 3 m ed una forza cimomotrice di 100 V, si ha, a 10 km di distanza, un campo riflesso:

$$F = 1,5 \mu\text{V/m}.$$

Questo campo è tale da consentire una ricezione chiara con una rivelazione per battimenti a frequenza acustica quale è quella che si ha nel metodo adottato.

Se il filo non è accordato, ed è inclinato rispetto alla direzione del campo elettrico, la [1] non è applicabile, e va sostituita con una formula più generale ⁽¹¹⁾.

(¹⁰) Nel seguito di questa esposizione, chiameremo tale gruppo senz'altro col nome di « telemetro », essendo la misura delle distanze la funzione precipua di esso.

(¹¹) Il filo ha in generale un diagramma di irradiazione, la cui forma dipende dal rapporto tra la lunghezza del filo e quella dell'onda; ne consegue che la forza cimomotrice, che esso assume nella direzione del ricevitore in virtù della corrente I dovuta al campo incidente, deve contenere nella sua espressione un fattore $\varphi(\beta)$ dipendente dall'angolo β tra il filo e la direzione del trasmettitore; inoltre occorre tener conto che in tal caso l'onda che torna sul telemetro è polarizzata nel piano individuato dal filo e dalla congiungente il telemetro col centro del filo. Se l'aereo ricevente è parallelo a quello trasmettente, risulta che la componente utile della forza cimomotrice è:

$$E = \frac{377 l_e I \varphi(\beta) \cos \alpha}{\lambda},$$

Quando, come è in genere il caso pratico, la propagazione si svolge lungo la superficie terrestre, bisogna tener presente che, oltre all'onda che arriva per la congiungente ostacolo-telemetro, va considerata quella che segue il percorso del raggio riflesso sul suolo. È necessario inoltre osservare che in pratica l'attenuazione rimane approssimativamente del tipo sferico solo entro l'ambito della portata ottica e che, oltre questo limite, bisogna introdurre in luogo della distanza effettiva la « distanza

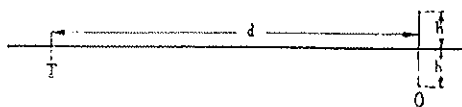


Fig. 5. — Riflessione su un elemento rettangolare piano, ortogonale alla direzione di propagazione.

virtuale» ⁽¹²⁾, che è maggiorata rispetto alla reale di tanto quanto occorre per tener conto della cresciuta attenuazione.

Passiamo ora a considerare un elemento riflettente piano, e supponiamo per semplicità che esso sia ortogonale alla direzione della propagazione e di forma rettangolare allungata, quale può essere, ad esempio, lo scafo di una nave collocata di fianco. È possibile trattare questo caso con le formule che l'ottica dà per la diffrazione attraverso fenditure, poichè tali formule valgono anche per la riflessione diffratta su elementi speculari rettangolari stretti.

avendo indicato con α l'angolo tra il piano di polarizzazione dell'onda riflessa e quello dell'onda in arrivo. L'intensità dell'eco sul ricevitore risulta:

$$F = \frac{377 l_e I \varphi(\beta) \cos \alpha}{\lambda d}$$

Il fattore $\varphi(\beta)$, essendo fra loro reciproche le proprietà del filo in funzione di captatore e di radiatore, deve comparire anche nella espressione della corrente indotta massima I :

$$I = \frac{F' l_e \varphi(\beta) \cos \alpha}{Z}$$

essendo Z l'impedenza del filo alla frequenza adoperata. Risulta dunque, essendo $F' = \frac{E'}{d}$:

$$[3] \quad F = \frac{377 E' l_e^2 \varphi^2(\beta) \cos^2 \alpha}{Z \lambda d^2}$$

Per adoperare questa espressione, è necessario conoscere $\varphi(\beta)$, l_e e Z , che vanno determinati caso per caso mediante i procedimenti noti alla teoria delle antenne.

Essa si annulla quando la $\varphi(\beta)$ è uguale a zero nella direzione del telemetro e può presentare numerosi massimi assai marcati.

⁽¹²⁾ Loc. cit. nota ⁽⁸⁾.

Supponiamo che gli aerei del telemetro T (fig. 5) siano eretti su una superficie piana conduttrice, e che l'ostacolo O , disposto a distanza d ortogonalmente alla direzione della propagazione, abbia un'altezza h dell'ordine di alcune lunghezze d'onda; ammettiamo inoltre che la superficie dell'ostacolo rifletta senza assorbimento. Possiamo, per i fini del nostro calcolo, sostituire alla considerazione di T e di O l'insieme formato da essi e dalle loro immagini rispetto alla superficie del suolo. L'intensità dell'onda, che torna riflessa su T , eguaglia quella che nello

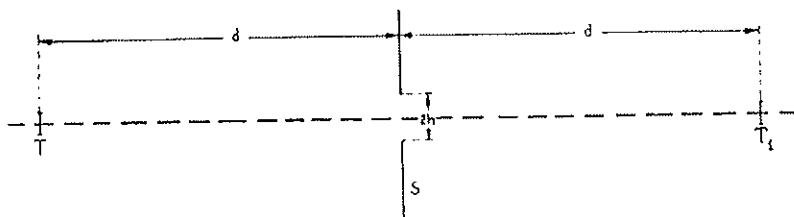


Fig. 6. — Sistema equivalente per il calcolo dell'intensità dell'onda riflessa da uno specchio piano: S è lo schermo portante la fenditura equivalente allo specchio, T_1 è il trasmettitore fittizio collocato simmetricamente al telemetro rispetto allo schermo.

stesso punto si avrebbe, se il trasmettitore fosse collocato sulla congiungente TO , nel punto simmetrico di T , rispetto ad O , e se, in luogo dell'ostacolo, vi fosse una fenditura alta $2h$, praticata in una parete piana che assorbe in modo perfetto (fig. 6).

Per il calcolo della intensità di campo in T , possiamo quindi applicare la formula nota dell'ottica ⁽¹³⁾:

$$F = F_0 \frac{w^2}{2},$$

essendo w dato dalla relazione:

$$w = e \sqrt{\frac{2(a+b)}{ab\lambda}};$$

e è la larghezza della fenditura (in questo caso $e = 2h$); a e b sono le distanze della sorgente e dello schermo, su cui si raccoglie la luce, dallo schermo S nel quale è praticata la fenditura (in questo caso $a = b = d$); F_0 è l'intensità nel caso di libera propagazione, cioè senza lo schermo S .

Si ha:

$$[4] \quad F = F_0 \frac{8h^2}{d\lambda} = \frac{E}{2d} \frac{8h^2}{d\lambda} = \frac{4Eh^2}{d^2\lambda}.$$

⁽¹³⁾ G. BRUHAT: Cours d'optique - Masson, Paris, 1935, cap. X.

Se il piano dell'ostacolo non è ortogonale alla direzione dell'onda, non può giungere sul telemetro il raggio riflesso principale, ed occorre utilizzare le onde diffratte che sono naturalmente assai più deboli. Il calcolo della intensità di queste risulta semplice, se la propagazione si svolge lungo il suolo e l'ostacolo è verticale e di forma rettangolare. Sostituiamo anche ora all'elemento speculare un'apertura in uno schermo verticale opaco, con una sorgente fittizia, disposta simmetricamente a quella

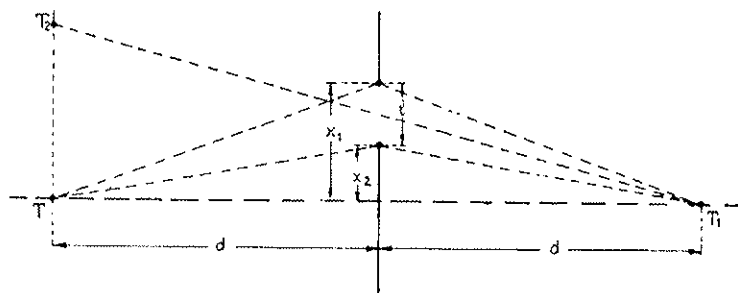


Fig. 7. — Sistema equivalente per il calcolo del campo diffratto da un ostacolo piano rettangolare inclinato rispetto alla direzione di propagazione.

reale rispetto ad esso; l'insieme da prendere come riferimento per il calcolo risulta come nella figura 7, il piano della figura essendo parallelo al suolo.

L'intensità dell'onda diffratta, che giunge in T per effetto della sorgente fittizia T_1 , si determina con l'aiuto delle tavole degli integrali di Fresnel, oppure mediante la spirale di Cornu. Occorre a tal fine calcolare i valori v_1 e v_2 che il parametro:

$$v = x \sqrt{\frac{2(a+b)}{ab\lambda}}$$

assume per i bordi verticali dell'apertura, essendo x la distanza di questi bordi dal punto in cui la congiungente TT_1 incontra lo schermo opaco. Posto, per esempio, $a = b = d = 5000$ m, $l = 200$ m, $x_1 = 1000$ m, $x_2 = 1200$ m, si ha, per $\lambda = 3$ m:

$$v_1 = 16,4, \quad v_2 = 19,7.$$

Riportando questi valori sulla spirale di Cornu, si trova che gli estremi dei tratti di curva rappresentativi cadono in una zona in cui la spirale può assimilarsi ad un insieme di cerchi con centro nel polo. Ne segue che, facendo variare la posizione di T nell'intorno di quella considerata nel calcolo, si debbono incontrare massimi e minimi di intensità: massimi quando gli estremi dei tratti v_1 e v_2 capitano in opposizione rispetto al polo della spirale ed allineati con esso, e minimi quando capitano allineati e dalla stessa parte. Se l'altezza h dell'osta-

colo può essere ritenuta molto grande rispetto alla lunghezza d'onda, si ha, per l'intensità nei massimi:

$$[5] \quad F' = 2 \varrho^2 F_0,$$

essendo ϱ il raggio di curvatura della spirale nel punto che corrisponde a $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$, ed F_0 il campo che si avrebbe a distanza doppia di quella tra ostacolo e telemetro nel caso di libera propagazione. Tenuto presente che:

$$\varrho = \frac{1}{\pi v},$$

si deduce nel caso nostro, per $F = 100$ V:

$$F' = \frac{E}{\pi^2 v^2 d} = 6 \mu\text{V/m}.$$

Se l'altezza h non è molto grande rispetto alla lunghezza d'onda, occorre tener conto dell'attenuazione che nasce per tale motivo.

Un risultato abbastanza approssimato si ottiene introducendo nella [5], in luogo del campo F_0 , il campo F del raggio riflesso principale, calcolato mediante la [4]. Per $h = 30$ m si ha, con i dati dell'esempio considerato:

$$F' = 3 \mu\text{V/m}.$$

Allorchè l'elemento piano ha una dimensione piccola rispetto alla lunghezza d'onda, le considerazioni di ottica surriferite conducono a concludere che esso si comporta come una sorgente filiforme per cui spariscono le frange di interferenza.

Passiamo ora a considerare il terzo caso, che si presenta nella maggior parte delle circostanze pratiche: quello di un ostacolo costituito da un ammasso di elementi svariati, per il quale non sia lecito ammettere direttività nella reirradiazione della potenza assorbita. Il calcolo approssimativo della intensità dell'onda di ritorno si esegue agevolmente determinando la potenza associata a quella porzione dell'onda diretta che investe l'ostacolo. Sappiamo che, se un sistema di onde piane progressive è caratterizzato da un'ampiezza F di campo elettrico, fluisce attraverso ogni metro quadrato di superficie ortogonale alla propagazione la potenza:

$$P_1 = \frac{F^2}{R_0},$$

essendo $R_0 = 376 \Omega$ la resistenza iterativa dello spazio.

Consideriamo il cilindro formato dalle rette parallele alla direzione di propagazione, appoggiate sul contorno dell'ostacolo, e sia S' la sezione

normale di esso. La potenza che fluisce in tale cilindro, associata all'onda diretta, è:

$$P = \frac{S' F'^2}{376} .$$

In realtà l'ostacolo impegna una superficie un po' maggiore della S' , poichè gli elementi che si trovano sul contorno assorbono potenza anche dalle porzioni di spazio immediatamente vicine. Per valutare approssimativamente la maggiorazione, che occorre apportare per tener conto di tale circostanza, ammettiamo che un dipolo in mezza onda assorba tutta la potenza P_d che fluisce in un cilindro parallelo alla propagazione e di sezione:

$$S = \frac{P_d}{P} = \frac{\frac{F'^2 \lambda^2}{73 \pi^2}}{\frac{F'^2}{376}} = 0,52 \lambda^2 ,$$

per cui, posto di attribuire a tale sezione la forma circolare, se ne ha il raggio:

$$r = \sqrt{\frac{0,52 \lambda^2}{\pi}} = 0,4 \lambda .$$

Siccome ammettiamo di adoperare onde ultracorte, è assai probabile che una parte degli elementi, che formano l'ammasso in questione, sia in risonanza od in quasi risonanza, tanto più che, stante l'alto valore della resistenza radiativa, l'acutezza di risonanza è molto scarsa ⁽¹⁴⁾. Possiamo quindi portare approssimativamente in conto la maggiorazione in parola considerando, in luogo del cilindro appoggiato direttamente sul contorno, il cilindro costituito dalle rette parallele alla direzione di propagazione e distanti $0,4 \lambda$ dal contorno stesso. Detta S la sezione che ora si ha, la potenza assorbita risulta:

$$P = \frac{S F'^2}{376} .$$

⁽¹⁴⁾ Un filo isolato e rettilineo può risuonare sull'onda di 3 m tutte le volte che la sua lunghezza è multipla di 1,5 m. Se è aggrovigliato ed in prossimità di altri fili, il numero dei circuiti risuonanti che possono casualmente formarsi diviene assai elevato.

Le costanti di un dipolo in mezza onda, avente diametro di 3 mm, sono approssimativamente, per $\lambda = 3$ m:

$$C = 1,2 \mu\mu F, \quad L = 2,1 \mu H, \quad R = 73 \Omega ,$$

per cui il coefficiente di risonanza risulta:

$$\epsilon = 18,3 ,$$

valore che corrisponde a un'acutezza di risonanza piuttosto modesta.

In virtù dell'ipotesi fatta, la potenza P viene reirradiata uniformemente in tutte le direzioni, per cui alla distanza d il flusso di potenza per metro quadrato è:

$$p = \frac{P}{2\pi d^2} = \frac{S F'^2}{2360 d^2},$$

avendo diviso per la superficie di mezza sfera per tener conto del fatto che il suolo riflette la parte di potenza che si irradierebbe in basso e che l'emissione è uniforme in ogni direzione.

D'altra parte il campo alla distanza d è $F' = \frac{E}{d}$; quindi:

$$p = \frac{S E^2}{2360 d^4},$$

da cui si deduce il campo dell'onda rinviata sul telemetro da un ostacolo a distanza d :

$$F = \sqrt{376 p} = \frac{E}{d^2} \sqrt{\frac{S}{2\pi}}.$$

Da questa formula, per ostacoli distanti una diecina di chilometri, aventi una superficie efficace S di alcune centinaia di metri quadrati, si ricavano, in base alla stessa forza cimomotrice di 100 V già considerata innanzi, campi riflessi dell'ordine di 10 $\mu\text{V/m}$, largamente bastevoli per il nostro tipo di rivelazione.

Tenendo presenti la [2], la [4] e la [5], si può concludere questa discussione sulle onde riflesse, affermando che l'intensità di campo di tali onde è in generale data da una relazione del tipo:

$$[6] \quad F = \gamma \frac{E}{d^2},$$

in cui γ è un coefficiente che dipende dalla natura e dalla disposizione dell'ostacolo ed ha le dimensioni fisiche di una lunghezza ⁽¹⁵⁾.

⁽¹⁵⁾ Ponendo la relazione precedente sotto la forma:

$$F = 374 \frac{l_e^2 E'}{73 d^2 \lambda},$$

si può definire una « lunghezza equivalente di reirradiazione » l_e dell'ostacolo. La l_e è infatti la lunghezza di quel dipolo che, collocato al posto dell'ostacolo in direzione parallela alle linee del campo elettrico, fornisce lo stesso campo reirradiato F . Questo dipolo equivalente ha un significato preciso e può esistere praticamente, se $l_e \leq \frac{\lambda}{\pi}$; diviene invece un'astrazione teorica nel caso contrario. Naturalmente la l_e può essere diversa per le varie orientazioni dell'ostacolo, se questo ha reirradiazione direttiva. La nozione di « altezza equivalente di reirradiazione » può servire in pratica a contrassegnare in modo significativo le attitudini di un ostacolo nei riguardi del fenomeno che interessa.

4. - Conclusioni.

Il problema di costruire radiotelemetri, capaci di soddisfare le esigenze applicative nel campo scientifico ed in quello tecnico, presenta altri aspetti ed altre difficoltà, che ci si riserva di illustrare in lavori successivi. In questo articolo si è voluto mostrare come le possibilità teoriche siano tali da giustificare la previsione che il nuovo ramo della radiotecnica, la radiotelemetria, stia per assumere un importante sviluppo.

Le considerazioni esposte hanno condotto inoltre a concludere che, alla base degli studi da svolgere nel nuovo campo di ricerca, devono porsi due osservazioni fondamentali: la prima è che l'ordine di grandezza dei campi riflessi con i quali si ha ordinariamente a operare è di una diecina di microvolt per metro, la seconda è che una sensibilità ed un potere separatore sufficienti possono ottenersi col metodo per variazione lineare di frequenza, modificato nel senso di ricavarne battimenti a frequenza acustica, assai meglio che col metodo degli impulsi. Queste affermazioni sono convalidate dalle esperienze eseguite con vari apparecchi, che presso il R. I. E. C. sono stati costruiti negli ultimi tre anni.

Livorno - R. Istituto Elettrotecnico e delle Comunicazioni della Marina.