

LA RADIOTELEGRAFIA (*)

(*) Conferenza tenuta nel 1922 al Radio Institute of Electrical Engineers di New York.

del Senatore GUGLIELMO MARCONI

Gran Croce dell'Ordine della Regina Vittoria (1) Dottore in scienze (2) - Dottore in legge (3)

La prima occasione in cui io ebbi l'onore di parlare ai membri dell' Institute of Electrical Engineers fu un'occasione particolarmente felice.

Ciò accadde poco più di 20 anni fa, esattamente il 13 gennaio 1902 (allora non esisteva ancora un Radio Institute), e in quel giorno, per me indimenticabile, fui ricevuto da oltre 300 membri del vostro Istituto ad una cena al Waldorf Astoria qui a New York. Ero stato invitato a tale cena in seguito al mio annuncio di essere riuscito a trasmettere il primo segnale radio attraverso l'Oceano Atlantico. Erano presenti molti uomini i cui nomi sono familiari alla scienza dell'elettricità, uomini come il Dr. Alexander Graham Bell, il Prof. Elihu Thompson, il Dr. Steinmetz, il Dr. Pupin, il Sig. Frank Sprague e molti altri. La cerimonia fu una di quelle che io non dimenticherò mai e che dimostrò in pieno tutta la prontezza non convenzionale propria dell' America, dato che l'avviso della cena era stato diramato con sole 48 ore di anticipo. Ciò che tuttavia ha lasciato in me, durante i vent'anni che sono trascorsi da quel giorno, il più tenace ricordo è che allora voi mostraste fiducia in me e in ciò che io vi dissi circa l'essere riuscito a trasmettere per la prima volta la semplice lettera S attraverso l'oceano dall'Inghilterra a Terranova, senza l'aiuto di cavi o conduttori. È per me ora della più grande soddisfazione potervi dire che, in un certo senso la fiducia concessa alla mia affermazione di allora forse non è stata fuori luogo, perché quei primi deboli segnali, che ricevetti il 12 dicembre 1901 a San Giovanni di Terranova, hanno provato una volta per tutte che le onde elettriche potevano essere trasmesse e ricevute attraverso l'oceano e che la radiotelegrafia a lunga distanza, intorno alla quale si erano in quegli anni sollevati tanti dubbi, stava realmente diventando un fatto incontrovertibile.

Voi comprenderete facilmente i miei sentimenti e quanto sia questa sera felice di avere ancora una volta l'onore di rivolgermi a voi, quando vi dirò che io ho sempre conservato gelosamente il ricordo del generoso incoraggiamento e del valido aiuto che mi avete così cordialmente dato, praticamente all'inizio della mia carriera, quando forse io ne avevo maggiore necessità. E me lo avete dato voi, appartenenti ad una istituzione così illustre e autorevole come l'American Institute of Electrical Engineers.

L'argomento di questa mia conferenza, “ *La Radiotelegrafia* “, è divenuto così vasto e complesso che voi comprenderete subito la mia difficoltà a trovare per esso un inizio ed una fine. Sarebbe assolutamente impossibile per me parlarvi esaurientemente di tutti i risultati attualmente raggiunti, particolarmente in un Paese come il vostro, che in brevissimo tempo ha compiuto passi giganteschi nello sviluppo teorico e nelle applicazioni pratiche della scienza e della tecnica della radiotelegrafia.

Inoltre, il tempo a mia disposizione non mi consentirà che di fare un rapido esame di alcuni dei molti problemi che sono stati in passato risolti, o che vi è una favorevole prospettiva di risolvere nel prossimo futuro.

Benché abbiamo, o crediamo di avere, tutti i dati necessari su la generazione, la trasmissione e la ricezione delle onde elettromagnetiche così come vengono attualmente usate per la radiotelegrafia, siamo ancora ben lungi dal possedere una conoscenza esatta sulle condizioni concernenti la trasmissione, o piuttosto la propagazione di quelle onde attraverso lo spazio, specialmente a grandi distanze.

Mi propongo ora di darvi qualche informazione su taluni recenti risultati ottenuti in Europa e altrove, e richiamare particolarmente la vostra attenzione su quello che io considero un settore alquanto trascurato dalla radiotelegrafia: lo studio cioè delle caratteristiche e delle proprietà delle onde elettriche molto corte. Sono sempre più convinto che solo dallo studio e dall'analisi accurata del più gran numero possibile di fatti e di risultati ben accertati sarà possibile superare le difficoltà che ancora sbarrano la strada all'applicazione pratica della radio intesa in tutti i sensi possibili.

Un grande impulso è stato dato alla radiotelegrafia e alla radiotelefonica dalla scoperta e dall'utilizzazione come oscillatore del tubo elettronico (o valvola a triodo) basata sulle osservazioni e le scoperte di Edison e di Fleming, su quelle di De Forest e infine su quelle di Meissner in Germania, di Langmuir e Armstrong in America e di H. W. Round in Inghilterra, osservazioni e scoperte che hanno condotto alla pratica realizzazione del più affidabile generatore di onde elettriche continue.

Il tubo elettronico, o triodo, o valvola come essa è ora generalmente chiamata in Inghilterra, è in grado non solo di agire come rivelatore, ma anche come generatore di oscillazioni. Essa ci ha fornito pertanto un dispositivo che è fondamentalmente lo stesso sia per il trasmettitore, sia per il ricevitore, e che ci mette a disposizione un metodo semplice e pratico con cui ottenere una ricezione da battimenti e una pressoché illimitata amplificazione della intensità dei segnali.

L'introduzione del triodo ha avuto come risultato di conferire, alle invenzioni fondamentali che resero possibile la radiotelegrafia a lunga distanza, un valore sempre crescente.

Può essere forse di un certo interesse che vi dia qualche informazione circa i progressi fatti in Inghilterra dalla Compagnia Marconi mediante la pratica applicazione del triodo.

Finora abbiamo comunemente usato molti tubi in parallelo per le nostre stazioni destinate a comunicazioni a grande distanza. Sono state ottenute potenze elevate, in pratica dell'ordine di 100 kW di uscita in antenna, impiegando numerosi tubi a bulbo di vetro in parallelo. Attualmente noi stiamo standardizzando delle unità capaci di fornire 4 kW in antenna con un numero di tubi adeguati ad ogni caso particolare.

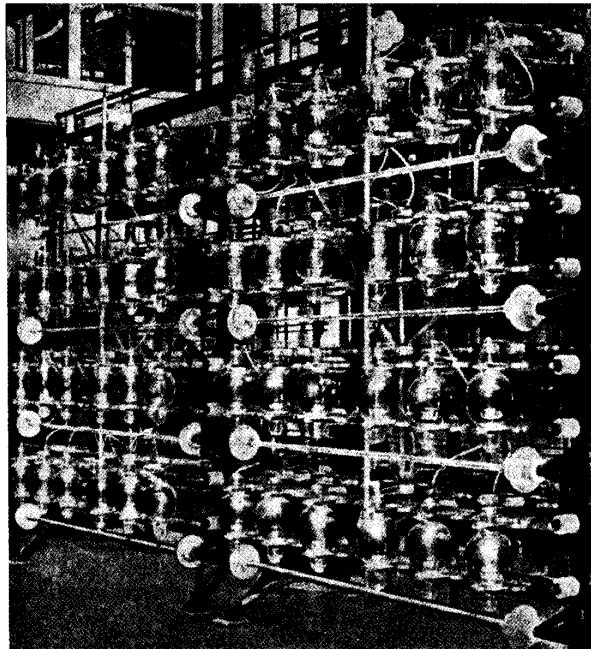


Fig. 1 – Pannello delle valvole a Carnarvon (Galles)

Qualche difficoltà era stata dapprima incontrata nel porre un numero considerevole di grandi tubi in parallelo; ma ora non abbiamo più difficoltà, anche con gruppi di 60 tubi in parallelo, che lavorano con una tensione in placca di 12.000 volt.

Mi si dice che non si incontrerebbero difficoltà insormontabili, qualora lo si desiderasse, ad inviare in antenna 500 kW, utilizzando un numero adeguato di questi tubi (fig. 1).

La vita dei tubi è stata considerevolmente aumentata e si ritiene che le unità da 4 kW abbiano una vita che dovrebbe superare le 5000 ore, secondo quanto risulta da un grande numero di prove compiute sia in laboratorio, sia nella stazione di Clifden.

Si sta ora procedendo anche allo sviluppo di singoli tubi di considerevole potenza. Da tempo ci siamo indirizzati alla produzione di tubi di elevata potenza, costruiti in quarzo. Sono state realizzate due versioni di ciascun tubo, una di minori dimensioni per ottenere 25 kW in antenna e un'altra per ottenere 75 kW. Tuttavia non ci attendiamo che il rendimento dei singoli tubi di alta potenza sia buono come quello delle unità di pari potenza composte da molti tubi; e sin ora il lavoro fatto su tali tubi viene considerato come una ricerca sperimentale.

Nel campo delle trasmissioni è stata intrapresa, durante gli ultimi due anni, una grande mole di ricerche sull'efficienza dei circuiti, particolarmente per utilizzare nel modo migliore l'energia disponibile.

Considerevoli aumenti di rendimento sono stati ottenuti nei circuiti di aereo o di antenna, e anche nel rendere minime le perdite nelle bobine. Gli ultimi risultati ottenuti indicano che è possibile ottenere un rendimento di irraggiamento nello spazio dell'ordine del 50 %, per lunghezze d'onda di circa 20.000 metri, quando, in questo caso particolare, si utilizzino naturalmente, data la lunghezza delle onde, piloni di un'altezza di 250 metri.

Il Sig. H. V. Round ha intrapreso ricerche molto accurate su tutte le perdite nelle bobine di adattamento e nelle altre parti dei circuiti associati in cui sono inseriti i tubi trasmettenti. Inoltre misure effettive con potenze considerevoli hanno mostrato che è realizzabile un rendimento globale del 70 % per la potenza d'ingresso sulle placche dei tubi rispetto a quella in antenna, evitando completamente le armoniche. Ciò significa un rendimento per la potenza in ingresso alle placche dei tubi, rispetto alla potenza effettivamente irradiata nello spazio, di circa il 35 %. Per quanto riguarda le stazioni ad onde più corte, questo rendimento si può ancora ulteriormente aumentare, benché questa possibilità sia difficilmente realizzabile a causa dei costi elevati: in Inghilterra disponiamo attualmente di una stazione trasmittente che lavora su una lunghezza d'onda di 3000 metri, con una altezza del pilone di 100 metri; essa ha un rendimento del 40 % dalle placche all'irraggiamento nello spazio.

Oltre che al problema del rendimento, è stata dedicata grande attenzione al problema di mantenere estremamente costante la frequenza, alla quale può essere ora garantito un elevatissimo grado di stabilità. Sono stati inoltre sviluppati metodi semplici e sicuri per assicurare elevata velocità di trasmissione. Essi possono essere usati sulle onde meno lunghe, trasmettendo sino a 200 parole al minuto, e, per le onde più lunghe, alla velocità consentita dalla costante di tempo dell'antenna. In Europa, cioè a Parigi e a Berna, nella trasmissione ad alta velocità, stiamo ora facendo funzionare stazioni per pubblico servizio a 100 parole al minuto, usando una singola antenna per due lunghezze d'onda. Benché l'impiegare una sola antenna per due lunghezze d'onda non sia consigliabile nel caso di elevate potenze, ciò risulta per certi aspetti vantaggioso nel caso di medie potenze, dove la conseguente perdita di rendimento può essere compensata da un lieve aumento della potenza.

Con queste lunghezze d'onda, si sta lavorando in duplex sia a Parigi sia a Berna, e praticamente tutto il traffico è svolto su macchine stampanti, benché vi siano momenti in cui, a causa dei disturbi atmosferici, la registrazione viene effettuata su nastro (4). In qualche raro caso si sono impiegati i telefoni, ottenendo quindi una ricezione acustica. La ricezione da queste stazioni per brevi distanze è stata effettuata per mezzo di un insieme di amplificatori accordati in alta e in bassa frequenza, posti in cascata, connessi all'antenna direzionale del tipo Bellini, disposta, quando questo era necessario, per la ricezione unidirezionale. Grandissima cura è stata posta nello schermare i circuiti riceventi, cosicché i circuiti accordati funzionano correttamente e si evita ogni effetto o influenza indesiderata dalla antenna sui circuiti stessi. Le caratteristiche di tutti questi circuiti sono state misurate molto accuratamente in modo da dare curve di risposta soddisfacenti per la velocità di lavoro richiesta e in modo che consentano agli operatori di accordare facilmente tali circuiti. Oltre alla protezione dalle interferenze data dalla ricezione direzionale, da una elevata selettività e da uno stadio di saturazione, non sono stati introdotti finora nella pratica metodi o idee particolarmente notevoli per eliminare i disturbi atmosferici.

Si stanno ora effettuando l'accurata misura e lo studio delle costanti di tutti i circuiti impiegati e si sta compiendo il progetto di circuiti più efficienti, in base ai risultati di tali misure. Un ulteriore risultato di queste ricerche è stato che esse hanno a loro volta suggerito considerevoli miglioramenti che saranno applicati in futuro, se si potrà disporre di mezzi adeguati.

La protezione dei ricevitori dai disturbi atmosferici può solo essere considerata, come lo sarà anche in futuro, una questione relativa, in quanto è del tutto ovvio che un dispositivo eliminatore di disturbi, funzionante in certe condizioni, cesserà di essere efficace allorché il disturbo arrivi con una intensità molto superiore a quella prevista, e diventerà d'altronde frequentemente inefficiente quando, in connessione alla debolezza dei segnali in ricezione, si aumenterà considerevolmente l'amplificazione. Sarebbe realmente interessante sapere in che misura il potenziamento dei trasmettitori CW, lo sviluppo nella ricezione direzionale e i miglioramenti nella sintonia, che hanno avuto luogo durante questi ultimi anni, hanno realmente accresciuto la nostra velocità di lettura e di affidabilità nelle trasmissioni sulle grandi distanze.

Poiché lo sviluppo è stato graduale, si è in genere pessimisti; tuttavia ritengo che siamo ora capaci, a parità di mezzi impiegati, di lavorare a velocità reali di circa 8-10 volte maggiori di quelle con cui eravamo in grado di lavorare nel 1912 nelle stesse condizioni atmosferiche.

L'interferenza con altre stazioni è naturalmente enormemente cresciuta e questo ha forse qualche volta messo in crisi l'aumento di velocità; ma fortunatamente l'evitare l'interferenza fra diverse radiostazioni è un problema di molto più facile soluzione che l'evitare i disturbi da onde elettriche naturali, ossia da disturbi atmosferici.

Fra i differenti tipi di amplificatori a tubi usati nelle moderne stazioni riceventi, l'amplificatore sintonizzato e in alta frequenza e in audiofrequenza è probabilmente quello che suscita il più grande interesse tecnico. In effetti tale interesse è pienamente giustificato dalle sue qualità selettive, insieme al migliore rapporto segnale/disturbo, che tale amplificazione è in grado di fornire. Questi vantaggi erano stati già completamente compresi dalla maggior parte di coloro che hanno lavorato nel campo della radio durante la guerra e non ritengo infatti che, al momento in cui venne firmato l'armistizio, vi fossero più molti radiolaboratori dove, a quell'epoca, non si fosse ancora sperimentato su questo tipo di ricevitore. Se quei ricercatori non ebbero generalmente un completo successo nel preparare e nel definire il progetto di apparati praticamente funzionanti, essi tuttavia indicarono che la principale difficoltà da superare consisteva nel combinare una considerevole amplificazione con la stabilità, e che la soluzione del problema diveniva rapidamente più difficile aumentando il numero dei tubi impiegati in cascata. Con stabilità intendo in questo caso l'essere liberi da ogni improvvisa generazione di oscillazioni, in qualunque parte dei circuiti dell'amplificatore.

Nel 1920, tuttavia, un importante passo avanti sulla strada da seguire per ottenere una pratica soluzione del problema venne compiuto dal Sig. G. Mathieu. Questo passo avanti consisteva nel disegno di un nuovo tipo di trasformatore in aria di accoppiamento tra due valvole, realizzato in modo tale da possedere una capacità elettrostatica estremamente piccola tra gli avvolgimenti e presentare la impedenza efficace del primario circa uguale alla resistenza interna efficace fra placca e filamento del tubo impiegato, quando il circuito secondario era portato in risonanza alla frequenza di oscillazione che si desiderava amplificare.

Fin dalle prime prove i risultati raggiunti con questi nuovi trasformatori apparvero essere completamente soddisfacenti. Il fattore di amplificazione di un tubo, infatti, è subito passato da 5 a circa 15, nel caso particolare preso in esame, mentre la stabilità si dimostrava incomparabilmente migliore di quella che era stata ottenuta in precedenza, anche quando la griglia del tubo era tenuta a un potenziale negativo di 1 o 2 volt.

Lo stesso principio ha avuto completo successo quando è stato applicato al progetto di trasformatori a bassa frequenza con nucleo di ferro. In questo caso tuttavia è risultato necessario adottare uno shunt ferromagnetico tra gli avvolgimenti, in modo da ottenere un accoppiamento sufficientemente lasco fra i circuiti primario e secondario del trasformatore. Recentemente il Sig. Mathieu ha ulteriormente migliorato la progettazione di questo trasformatore ad alta frequenza rendendolo astatico. Uno di questi nuovi apparecchi, con trasformatori sintonizzati in alta e in bassa frequenza, è stato utilizzato ogni giorno nel mio yacht durante il mio viaggio dall'Inghilterra all'America, e i risultati delle prove eseguite a bordo confermano pienamente l'affidabilità dell'apparato e assicurano la superiorità sopra il tipo normale di amplificatore.

Da qualche anno la maggior parte dei radiotecnici aveva chiaramente compreso che la radiotelegrafia aveva ormai raggiunto uno stadio di sviluppo in cui si era ottenuto quasi tutto quello che ci si poteva aspettare in base a semplici congetture, e che il miglioramento e lo sviluppo di servizi telegrafici commerciali su quelle grandi distanze, che una volta consideravamo insuperabili, necessitava di qualche ben definita conoscenza sui seguenti punti:

- 1) l'intensità di segnale su cui potere fare affidamento con determinati dispositivi su queste distanze e
- 2) la questione prioritaria del rapporto segnale/disturbo e segnale/interferenza rilevabile nella stazione ricevente in varie parti del mondo.

Prima di tutto si doveva sviluppare un apparato sicuro e conveniente per ottenere i dati necessari relativi a entrambi i punti ora detti. Ora questo apparato è sistematicamente in funzione con continuità, in numerose località molto distanti fra loro, con il risultato che una grande quantità delle migliori informazioni ottenibili è stata raccolta ed è ora in corso di elaborazione. In

questi punti di osservazione i segnali provenienti da stazioni lontane sono misurati in tutte le ore del giorno e della notte, insieme con l'intensità delle interferenze e dei disturbi, e insieme anche con la direzione da cui i disturbi sembrano provenire. Le misure sono fatte in modo tale che la potenza che sarebbe richiesta alla stazione trasmittente per dare la minima leggibilità, è usata come misura del disturbo, in quanto questo dato è ciò che interessa il radiotecnico per un progetto appropriato della sua stazione trasmittente. Questo è un metodo che dà un risultato molto soddisfacente e in pratica sicuro, e che penso potrebbe ben essere usato da parte di tutti.

In poche parole questo metodo consiste nell'indurre nell'antenna segnali CW prodotti dall'apparato di misura, rendendo questi segnali uguali a quelli ricevuti a distanza dalla stazione trasmittente. La tensione applicata all'antenna può essere allora letta direttamente. Per questo scopo viene usata un'antenna di dimensioni standard e di conseguenza si può calcolare l'intensità del segnale in microvolt per metro. Qualora i segnali siano illeggibili a causa di disturbi atmosferici, l'apparato di misura viene usato per inviare a un operatore, a una velocità standard di 20 parole per minuto, 5 lettere in codice, mentre la tensione applicata all'antenna dalla trasmittente locale viene aumentata fino a che si ottiene una completa leggibilità. Allora il rapporto tra la nuova tensione applicata all'antenna e la vecchia tensione uguale a quella dei segnali ricevuti, dà, una volta per tutte, una stima molto corretta di quanto la potenza della stazione trasmittente dovrebbe essere accresciuta per assicurare la leggibilità. Poiché questa variazione può essere portata sull'antenna e fornire diagrammi di direzione, questo metodo risulta ovviamente di grande utilità pratica.

Il problema se sia o no possibile trasmettere segnali radio tra gli antipodi intorno alla terra è uno di quei problemi che mi ha sempre affascinato. In realtà la distanza tra gli antipodi è la più grande distanza utile possibile che può essere coperta dalla radio su questo nostro piccolo pianeta, e da questo punto di vista il problema era importante anche perché una tale distanza comprendeva tutte le distanze fra tutti gli altri punti della terra, ovviamente inferiori. Sedici anni fa, nel corso di una conferenza che tenni il 3 marzo 1905 alla Royal Institution a Londra, espressi la mia convinzione che, se si fosse provato che la trasmissione tra gli antipodi era possibile, le onde elettromagnetiche trasmesse avrebbero dovuto passare sopra a differenti parti del globo, girando intorno ad esso, da una stazione all'altra, e forse tutte le onde avrebbero dovuto convergere e concentrarsi agli antipodi. In questo modo pensavo potesse essere possibile mandare i messaggi a tali distanze, utilizzando solo una modesta quantità di energia elettrica. Inoltre, nel corso di quella conferenza, avevo anche mostrato un modello del globo terrestre e tentato di spiegare come pensassi che le onde potessero rinforzarsi l'un l'altra se arrivavano nella fase opportuna o, in altre parole, che potessero concentrarsi in luoghi posti agli antipodi della stazione trasmittente, o vicino ad essi.

I risultati ottenuti recentemente stanno a dimostrare la relativa facilità con cui i segnali radio possono ora essere mandati dall'Inghilterra all' Australia, e sembrano indicare che vi è qualcosa di valido nell'idea di onde radio che viaggiano intorno alla terra secondo vari percorsi e che si riuniscono in località situate vicino agli antipodi.

Eppure dati ancora più interessanti e precisi sono stati ottenuti durante altri esperimenti recentissimi.

Due spedizioni, una in Brasile e l'altra nella Nuova Zelanda, hanno compiuto un numero notevole di osservazioni estremamente interessanti e istruttive e, anche se i rapporti completi su queste osservazioni non sono ancora stati ricevuti, penso che senza dubbio sarete interessati ai risultati di questi importanti esperimenti che ora vorrei comunicarvi.

La spedizione del Brasile, di cui facevano parte il Sig. H. H. Beverage della Radio Corporation of America, N.W. Rust della Marconi's Wireless Company inglese e il Sig. W. Eichhoff e il dr. Esau della Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie (Telefunken) di Berlino, ha proprio ora completato una serie di osservazioni in vari punti della Costa Atlantica del Sud America, dove l'intensità dei segnali da stazioni europee e da altre stazioni è stata osservata e misurata a tutte le ore del giorno e della notte, e dove la direzione e l'intensità dei disturbi atmosferici sono stati parimenti osservati e registrati durante considerevoli periodi di tempo.

L'altra spedizione, sotto la direzione dal Sig. E. Tremellon della Marconi Company inglese, ha proprio ora completato il suo lavoro di misurare segnali provenienti da tutte le stazioni di alta potenza, europee e americane, nel corso di un viaggio fra l'Inghilterra e la Nuova Zelanda, via Canale di Panama. Dalla massa di informazioni ottenute su segnali ricevuti sia di giorno

sia di notte sarebbe possibile tra l'altro ricostruire la formula di attenuazione. Incidentalmente posso dire che i segnali superano grandemente in intensità quello che ci si sarebbe dovuti aspettare in accordo alla formula di Austin-Cohen, che non sarebbe quindi accettabile per distanze estremamente lunghe.

Misure complete dall'Inghilterra agli antipodi sono state fatte sui segnali trasmessi da Carnarvon, Nauen, Bordeaux e Hannover.

Anche in Brasile sono state compiute tali misure su segnali emessi dalle stazioni americane di alta potenza e dalla stazione della marina americana, N.P.O. a Cavite (nelle Isole Filippine). In entrambe queste spedizioni, in Brasile e in Nuova Zelanda, è stato notato in modo definitivo e indipendente il fatto, posto in luce a mio parere per la prima volta, che segnali da stazioni a grandissima distanza non sempre mantengono la loro direzione, viaggiando lungo un cerchio massimo, ma raggiungono il ricevitore lungo una altra traiettoria o seguendo varie traiettorie intorno alla terra.

Queste importanti osservazioni erano fatte mediante antenne direzionali, fatte in modo da fornire il ben noto diagramma a forma di cuore. Il fenomeno estremamente interessante che ora riporterò, è stato registrato indipendentemente da entrambe le spedizioni. Esso è stato ottenuto in molte occasioni, durante quello che potrebbe essere chiamato un periodo di transizione. In tali condizioni l'onda intorno alla terra continua a spostarsi da una traiettoria all'altra, e due o più gruppi di onde quando venivano ricevute da una semplice antenna verticale, producevano battimenti discretamente lenti, rassomiglianti a segnali Morse, causati dalla mutua interferenza o da una somma di due gruppi di onde. Al contrario, su un dispositivo direzionale con diagramma a forma di cuore, i segnali erano completamente stabili e normali, quando questo dispositivo era orientato in modo da ricevere solo, secondo una determinata direzione.

Naturalmente bisognerebbe notare che quando si è molto vicini agli antipodi vi è solo una piccola differenza fra ognuno dei cerchi massimi che congiungono la stazione trasmittente alla ricevente, cosicché non si può conservare la costanza della direzione. Invece questa direzione appariva mantenersi definitivamente sicura a distanza di circa due mila miglia dagli antipodi. Gli osservatori notarono che i segnali americani provenienti da New York (Radio Central) e da Tuckerton venivano da una direzione che indicava come essi preferivano viaggiare lungo un percorso pari a tre quarti del giro intorno alla terra, piuttosto che venire dalla via più breve. Inoltre, in accordo ai rapporti ricevuti in altre occasioni dagli osservatori agli antipodi o vicino agli antipodi delle stazioni inglesi o tedesche, gli indicatori di direzione spesso ricevevano i segnali come provenienti circolarmente da tutte le direzioni.

In diverse occasioni, secondo quanto ha riferito il Sig. Tremellon da Rocky Point, in Nuova Zelanda, si è notato un altro interessante risultato alquanto straordinario. Qui, durante il marzo scorso, sembrava che i segnali provenienti da Nauen arrivassero via Polo Sud, mentre quelli provenienti da Hannover, anch'esso situato in Germania e non molto lontano da Nauen, sembravano preferire la traiettoria passante per il Polo Nord.

Si sta ora compiendo in Australia una serie molto più completa ed esauriente di osservazioni presso stazioni fisse, così da ottenere, se è possibile, tutte le variazioni da un periodo all'altro dell'anno.

Sembra sia stato accertato definitivamente e in modo generale che le sorgenti dei disturbi atmosferici sono situate principalmente sulla terra ferma. Osservazioni eseguite in Brasile indicano che un tipo di disturbo atmosferico conosciuto come " *grinder* " ha origine molto lontano e viene da una direzione che indica la Costa Africana; e questo a una certa ora del giorno, quando il disturbo raggiungerebbe un massimo. Inoltre tali osservazioni hanno posto in luce un disturbo molto violento del tipo « *click* » proveniente da una direzione che indica come sorgente un punto vicino del Sud America.

Durante il mio recente viaggio attraverso l'Atlantico a bordo dello yacht Elettra notammo, fino a circa metà strada (a parte effetti di tempeste locali) le interferenze di disturbi che sembravano provenire principalmente dai continenti europei ed africani, mentre, nella seconda metà del nostro viaggio, essi sembravano provenire da direzioni occidentali, cioè dal continente americano.

Questo radicale cambiamento nella direzione d'origine di questi disturbi atmosferici è stato notato in condizioni simili dal Sig. Tremellon attraversando il Pacifico.

È una grande fortuna per il servizio radio attraverso l'Atlantico settentrionale tra le stazioni del Nord America e quelle della Europa, soprattutto per le stazioni dell'Europa Occidentale, che questo tipo di disturbo proveniente da posti vicini arrivi da direzioni che differiscono grandemente da quelle da cui si ricevono le trasmissioni. I continenti che si trovano nella direzione delle stazioni trasmettenti sono così lontani e così temperati, da non produrre fastidiosi disturbi atmosferici alle stazioni riceventi dall'altra parte dell'Oceano.

Un altro fatto che può essere dedotto abbastanza bene da queste prove su grandi distanze è che la trasmissione dall'Ovest all'Est risulta più facile che quella dall'Est all'Ovest. Ciò sottolinea la necessità di precisare o modificare la formula delle trasmissioni a grande distanza.

Verrà pubblicato tra breve un lavoro scientifico in cui sono riportati i risultati delle misure e di tutta l'attività svolta, nonché delle osservazioni fatte in queste due spedizioni.

Considererò ora un'altra branca molto importante della scienza della radiotelegrafia, che posso dire sia stata a lungo la più gravemente trascurata. Si tratta dell'impiego di onde molto corte, specialmente per quanto riguarda la loro applicazione alla radiotelegrafia e alla radiotelegrafia direzionali.

Qualche anno fa, durante la guerra, non potei evitare di pensare che ci eravamo piuttosto limitati, confinando praticamente tutte le nostre ricerche e tutte le nostre prove a quelle che posso chiamare onde lunghe, cioè onde di qualche migliaio di piedi di lunghezza. Tale riflessione si basava specialmente sul ricordo che, durante i miei primi esperimenti nel lontano 1895 e 1896, avevo ottenuto qualche promettente risultato con onde non più lunghe di pochi pollici.

Lo studio delle onde corte cominciò al tempo della scoperta delle stesse onde elettriche, cioè al tempo dei classici esperimenti di Hertz e dei suoi contemporanei. Hertz usò, infatti, in tutti i suoi esperimenti onde elettriche di breve lunghezza e fece anche uso di riflettori per provare le loro caratteristiche e per mostrare, fra le molte altre cose, che le onde da lui scoperte obbedivano alle normali leggi della riflessione ottica.

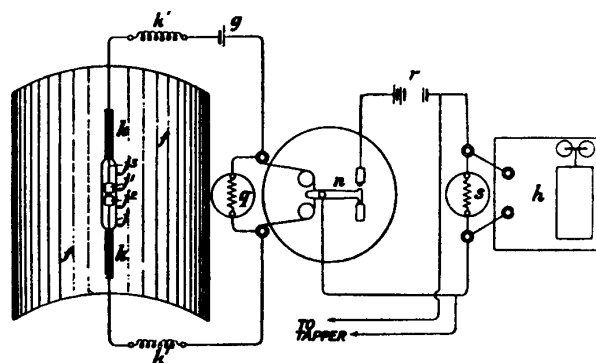


Fig. 2 – Primo ricevitore direzionale a onde corte

Come ho già detto, le onde corte sono state anche le prime con cui ho sperimentato io stesso nei primissimi stadi della storia della telegrafia senza fili e si può forse richiamare il seguente fatto. Quando circa 26 anni fa andai in Inghilterra, fui in grado di mostrare al defunto sir William Preece, allora ingegnere capo al British Post Office, la trasmissione e la ricezione di segnali intelligibili su distanze di un miglio e tre quarti per mezzo di onde corte e di riflettori (fig. 2 e 3), mentre, particolare abbastanza curioso, per mezzo di antenne e di sistemi affini di notevole altezza, mi riuscì allora solo di ottenere segnali su distanze di mezzo miglio.

Il progresso fatto con le onde lunghe e con l'antenna fu così rapido, e al confronto così facile e così spettacolare, che distrasse praticamente tutta l'attenzione dalla ricerca con le onde corte. Ritengo che questa circostanza sia stata deplorabile, perché vi sono moltissimi problemi che possono essere risolti e un grandissimo numero di utili risultati che possono essere ottenuti con l'uso di sistemi ad onde corte, e solo con quelli.

Sir William Preece descrisse le mie prime prove nel corso di una riunione alla British Association for the Advancement of Science nel settembre del 1896, e anche in una conferenza che egli fece davanti alla Royal Institution a Londra il 4 giugno 1897.

Il 3 marzo del 1899 approfondii l'argomento delle onde corte in un lavoro che lessi davanti all' Institution of Electrical Engineers a Londra, ed è su questo lavoro che io vorrei richiamare la vostra attenzione, perché a mio parere esso è di qualche interesse dal punto di vista storico.

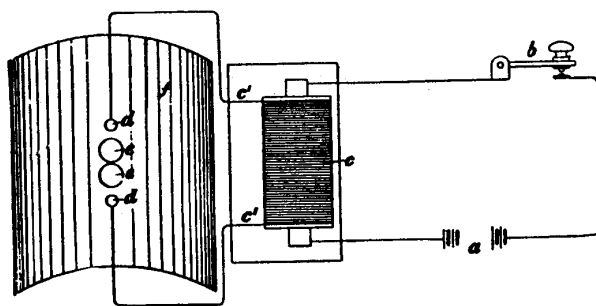


Fig. 3 – Primo trasmettitore direzionale a onde corte

In quella conferenza mostrai come era possibile, per mezzo di onde corte e di riflettori, proiettare le radiazioni in un fascio lungo una sola direzione, invece di consentire a queste radiazioni di propagarsi tutt'intorno. In tal modo esse non potevano avere alcun effetto su un qualunque ricevitore che si trovasse fuori dall'angolo di propagazione del fascio. In quell'occasione io descrissi, inoltre, prove eseguite trasmettendo mediante un riflettore un fascio di onde attraverso la campagna di Salysbury Plain, in Inghilterra, e misi in luce la possibile utilità di un tale sistema, qualora venisse applicato ai fari e ai battelli-faro in modo da porre le navi in grado di evitare, in caso di nebbia, punti pericolosi vicino alle coste. Mostrai inoltre i risultati ottenuti da un fascio di onde proiettate attraverso la sala, e come un ricevitore poteva essere azionato e far suonare un campanello solo quando l'apertura del riflettore trasmettente era diretto verso il ricevitore.

Dopo queste ultime prove di circa 20 anni fa, praticamente non vennero più effettuate ricerche o pubblicati risultati concernenti le onde corte, almeno per quanto io posso sapere, per parecchi anni.

Fare una ricerca lungo queste linee non sembrò facile, né promettente: l'uso di riflettori di dimensioni ragionevoli implicava l'uso di onde di soli pochi metri di lunghezza, che erano difficili da generare, e, fino a tempi relativamente recenti, la potenza che poteva essere così utilizzata era piccola. Queste circostanze, unite al fatto della grandissima attenuazione di tali onde su qualunque distanza sia in terra sia in mare, avevano portato a conclusioni molto scoraggianti.

La ricerca in questo settore era di nuovo ripresa da me in Italia nel 1916, con l'idea di utilizzare per scopi bellici onde molto corte, combinate con riflettori. Nelle prove che ne sono seguite durante quell'anno e dopo, ero assistito nel modo migliore possibile dal Sig. C.S. Franklin della British Marconi Company.

Da allora il Sig. Franklin ha seguito il settore con grande impegno, e i risultati ottenuti sono stati descritti da lui in un articolo letto alla Institution of Electrical Engineers di Londra il 3 aprile del 1922. La maggior parte dei fatti e dei risultati che mi propongo di comunicarvi sono presi dall'articolo del Sig. Franklin.

Il lavoro effettuato nelle esperienze con queste onde molto corte nel 1916 era estremamente interessante e sembrava riportarci ai primi tempi della telegrafia senza fili, quando ci si trovava di fronte a un campo completamente vergine.

Le onde usate avevano una lunghezza di 2 e di 3 metri. Con queste onde i disturbi atmosferici potevano dirsi praticamente inesistenti e la sola interferenza che si poteva rilevare veniva dagli apparati di accensione di automobili o di motoscafi.

Queste macchine sembrano emettere onde elettriche di una lunghezza d'onda che va circa da 40 metri a valori prossimi a zero. Potrà venire il giorno in cui questi apparati di accensione dovranno essere schermati, o ottenere una licenza dal governo in quanto stazioni trasmettenti!

Incidentalmente posso accennare al fatto che uno di questi ricevitori a onde corte potrà funzionare come un eccellente dispositivo per verificare, anche a distanza, se un apparato di accensione sta funzionando in modo del tutto corretto, oppure

no. Qualche motorista resterebbe sorpreso, rendendosi conto di quanto spesso i suoi magneti e le sue candele stanno funzionando in maniera deplorabilmente irregolare.

Durante le mie prove del 1916 usai un trasmettitore a scintille accoppiate, in cui il primario aveva un condensatore in aria e la scintilla in aria compressa. Con questi accorgimenti la quantità di energia in gioco risultava aumentata, e il piccolo spazio in cui scoccava la scintilla in aria compressa presentava una resistenza molto bassa.

Il ricevitore usato in un primo tempo era un ricevitore a cristallo, mentre i riflettori impiegati erano realizzati con numerose strisce o fili, accordati sull'onda usata e disposti su una superficie cilindrica a paraboloide, con l'antenna lungo l'asse.

Il riflettore trasmittente era realizzato in modo tale che poteva essere orientato e che gli effetti potevano essere studiati a distanza sul ricevitore.

Il Sig. Franklin ha calcolato nel piano orizzontale la curva polare di irraggiamento nello spazio (fig. 4) che si otterrebbe con riflettori di varia apertura, assumendo che le onde lascino il riflettore come onde piane di intensità uniforme aventi una larghezza uguale all'apertura del riflettore. Le curve calcolate sono in accordo molto buono con i risultati osservati. In fig. 4 sono mostrate le curve calcolate per riflettori aventi apertura uguale a 1, 2, 3 e 5 lunghezze d'onda. Sono stati provati riflettori con apertura fino a tre lunghezze d'onda e mezzo e le curve polari misurate si accordano in verità molto bene con i valori calcolati.

Gli esperimenti eseguiti in Italia hanno mostrato che un buon funzionamento direzionale poteva sempre essere ottenuto con riflettori adeguatamente proporzionati in base alla lunghezza d'onda impiegata. Con gli apparati allora disponibili la distanza di trasmissione ottenuta è stata di 6 miglia.

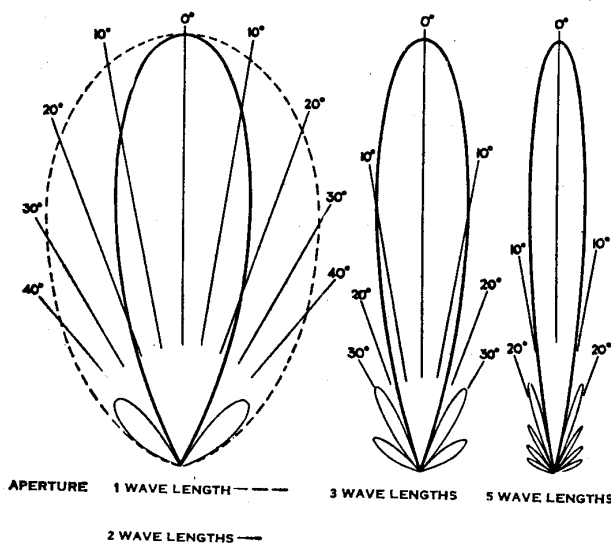


Fig. 4 – Curve polari di riflettori calcolate teoricamente

- Apertura: a) - - - 1 lunghezze d'onda
2 lunghezze d'onda
b) 3 lunghezze d'onda
c) 5 lunghezze d'onda

Nel 1917 le prove sono state continuate in Inghilterra a Carnarvon. Con trasmettitore a scintilla in aria compressa, con onde di lunghezza pari a 3 metri e con un riflettore avente un'apertura di 2 lunghezze d'onda e un'altezza di 1,5 lunghezze d'onda, si è ottenuta con facilità una distanza di trasmissione di circa 20 miglia usando un ricevitore senza riflettore.

Nel 1919 vennero iniziati dal Sig. Franklin, a Carnarvon, ulteriori esperimenti nei quali sono stati usati tubi elettronici (o valvole) per generare queste onde molto brevi, nel tentativo di sviluppare un sistema direzionale radiotelefonico.

È stata scelta una lunghezza d'onda di 15 metri, che poteva essere generata facilmente dal tipo di tubo elettronico impiegato.

Dopo aver superato qualche difficoltà pratica, messaggi parlati molto forti e chiari si sono ricevuti in Holyhead, a venti miglia di distanza. Sono state successivamente effettuate prove a distanze maggiori, e un apparato ricevitore di questo tipo è stato installato su uno dei battelli postali che fanno la spola fra l'Inghilterra e l'Irlanda.

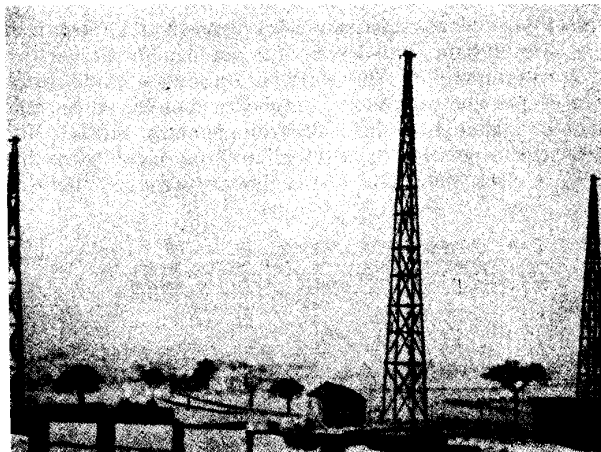


Fig. 5 – Trasmittitore direzionale (Hendon)

Durante queste prove sono stati ricevuti messaggi parlati lungo tutto il percorso fino alla costa irlandese e in Kingstown Harbour, a una distanza di 78 miglia da Carnarvon. Venne inoltre rilevato il fatto importante che non vi era alcuna rapida diminuzione nella intensità dei segnali dopo che il battello aveva oltrepassato la linea dell'orizzonte rispetto a Carnarvon.

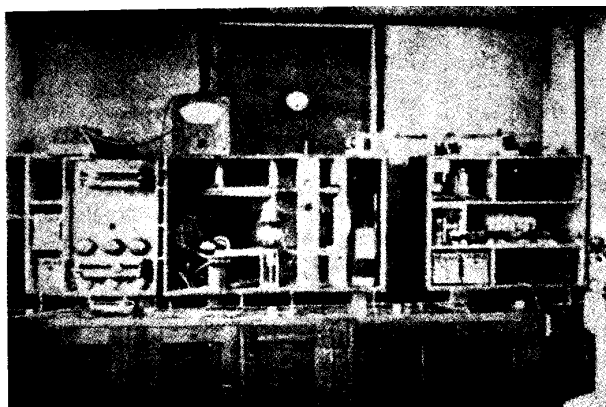


Fig. 6 – Trasmittitore e ricevitore sperimentali per onde corte a Hendon

Grazie al successo di questi esperimenti, venne deciso di intraprendere ulteriori prove attraverso la terra ferma, su una distanza di 97 miglia fra Hendon (Londra) e Birmingham.

Usando riflettori in ricezione e in trasmissione, si accertò subito che fra le due stazioni si potevano scambiare messaggi parlati chiari e di buona qualità a tutte le ore.

Ora vi darò alcuni particolari dei dispositivi impiegati a Hendon e a Birmingham (fig. 5 e 6). La potenza fornita ai tubi impiegati è usualmente di 700 watt. L'antenna è piuttosto lunga, alquanto di più che una mezza lunghezza d'onda, ed ha una resistenza di irraggiamento che è eccezionalmente alta. In ingresso il rendimento in potenza dai tubi all'antenna è compreso tra il 50 e il 60 %, e circa 300 watt sono realmente irraggiati nello spazio.

POLAR CURVE HENDON REFLECTOR
28 METRE APERTURE 14.8 METRE WAVE
MEASURED ON CIRCLE 31 METRE RADIUS

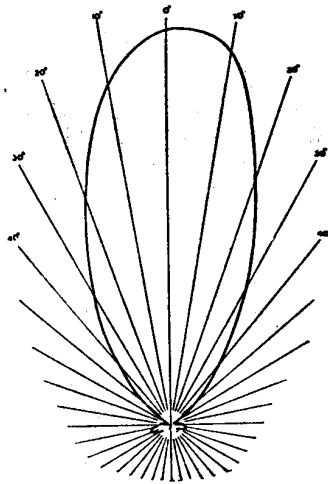


Fig. 7 – Curva polare del riflettore di Hendon (con un’apertura di 28 metri e una lunghezza d’onda di 14,8 m) misurata su di un cerchio di 31 m di raggio.

Con i riflettori attualmente impiegati su entrambe le stazioni il parlato è forte e di qualità molto buona. Esso è usualmente abbastanza forte da essere completamente udibile con uno shunt compreso tra 1/4 e 1/2 Ohm posto in parallelo a un telefono da 60 Ohm.

Quando entrambi i riflettori venivano abbassati, e posti quindi fuori uso, il parlato era appena udibile senza lo shunt. Misure di media fatte dal Sig. Franklin indicano che il valore dell’energia ricevuta, quando entrambi i riflettori sono in funzione, è circa 200 volte superiore a quella dell’energia ricevuta senza riflettori. Questi dati sono stati ulteriormente confermati da misure locali prese intorno alle stazioni.

La fig. 7 mostra una curva polare del campo della stazione di Hendon misurata in vicinanza del riflettore. Essa è alquanto asimmetrica, in conseguenza forse del fatto che la terra è in pendenza e a causa delle riflessioni locali di alberi e fili.

A qualcuno dei miei assistenti è capitato di osservare che una curva polare locale rilevata intorno alla stazione può non essere la stessa curva presa a distanza, e che a distanza l’effetto direzionale poteva essere perso. Sono tuttavia d’accordo con il Sig. Franklin che le cose non stanno così.

Esperimenti intrapresi con riflettori rotanti, che rendono facile effettuare le misure a qualsiasi distanza, provano che il diagramma polare per un dato riflettore e per una data lunghezza d’onda è praticamente costante a tutte le distanze.

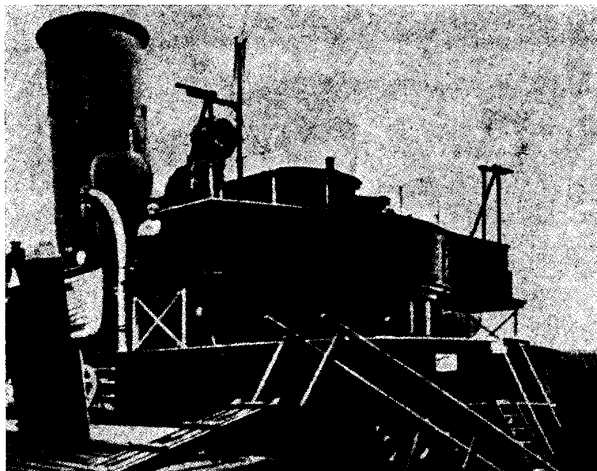


Fig. 8 – Ricevitore a onde corte sul battello faro “ Pharos “.

Mediante tubi elettronici appropriati, è ora del tutto possibile produrre onde da circa 12 metri in poi e utilizzare inoltre una potenza di diversi kilowatt. Ciò è anche fattibile disponendo valvole in parallelo.

Durante le prove a Carnarvon, si è trovato che era certamente possibile effettuare la ricezione sulla antenna trasmittente, mentre il trasmettitore stava funzionando.

Questo sistema che evita tutte le commutazioni, viene usato ora con successo per la trasmissione in duplex tra Hendon e Birmingham.

I riflettori stanno ora mostrando un altro inaspettato vantaggio, oltre a quelli, già noti, di lavorare in modo direzionale e di risparmiare potenza, vantaggio probabilmente comune a tutti i sistemi fortemente direzionali. È stato notato, cioè, che non si ha praticamente nessuna distorsione della trasmissione in fonia, come viceversa si era spesso notato con i trasmettitori e i ricevitori non direzionali, anche quando usavano onde corte.

È chiaro che i risultati fra Hendon e Birmingham costituiscono un record per la radiotelegrafia, per quanto concerne il rapporto distanza/lunghezza d'onda, perché bisogna notare che Birmingham dista da Hendon di 10.400 lunghezze d'onda.

Noi consideriamo tuttavia che questi risultati rappresentino solo quello che poteva essere ottenuto da un primo tentativo, e non quello che può essere fatto ora che abbiamo acquisito una certa esperienza.

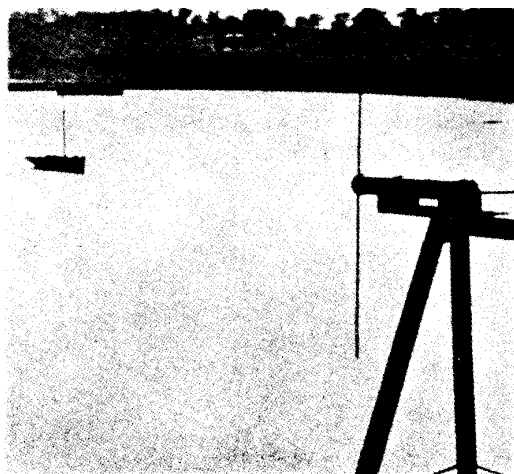


Fig. 9 – Ricevitore a onde corte

In questo modo si è dunque mostrato per la prima volta che le onde elettriche con lunghezza d'onda da 15 a 20 metri sono certamente in grado di provvedere su distanze considerevoli a un buon e affidabile servizio direzionale da punto a punto. In questi giorni di espansione della radiodiffusione, può essere veramente molto utile avere un nuovo sistema pratico di trasmissione tale che assicuri alla trasmissione un grado di segretezza assai elevato, soprattutto se comparato con l'usuale tipo di radiotrasmissione.

I risultati ottenuti con i riflettori sono così buoni, che sono stato tentato di sperimentare la mia vecchia idea di 26 anni fa, e di provare questo sistema come localizzatore per navi vicino a punti pericolosi. Un tale sistema si sta ora provando in Scozia grazie ai sigg.ri D. e C. Stevenson, per opera della Commissione dei Fari del Nord. Si stanno ora facendo esperimenti sotto la supervisione del Sig. Franklin con un riflettore rotante eretto nelle isole di Inchkeith nel Firth of Forth vicino a Edimburgo.

Il trasmettitore e il riflettore, entrambi rotanti, agiscono come una sorta di semaforo senza fili. Per mezzo del fascio rotante di radiazione elettrica è possibile per le navi, quando si trovano entro una certa distanza, stabilire con scarsa visibilità il rilevamento e la posizione del faro.

Il riflettore sperimentale rotante è stato installato sul piroscalo Faros durante l'autunno del 1920 (fig. 8) e con esso vennero eseguite le prime prove.

POLAR CURVES INCHKEITH REFLECTOR
5.5 METRE PARABOLA 11 METRE APERTURE
MEASURED AT 4 MILES FROM TRANSMITTER.

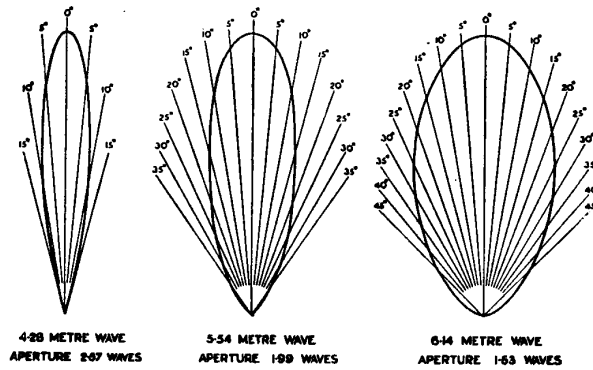


Fig. 10 – Curve polari del riflettore di Inchkeith di 5,5 m, con parabola di 15 m di apertura, misurate a 4 miglia dal trasmettitore

- a) onda di 4,28 m; apertura di 2,57 lunghezze d'onda
- b) onda di 5,54 m; apertura di 1,99 lunghezze d'onda
- c) onda di 6,14 m; apertura di 1,63 lunghezze d'onda

La distanza utile ottenuta è risultata di 7 miglia, con un trasmettitore a scintilla che funzionava su una lunghezza d'onda di 4 metri, e impiegando sulla nave un riflettore e un ricevitore a un solo tubo, opportunamente accordato. Al riflettore veniva fatta compiere una rivoluzione completa ogni due minuti, ed un segnale caratteristico era trasmesso ogni mezzo punto della bussola. A bordo del piroscalo è stato accertato che questo dispositivo consentiva il rilevamento del trasmettitore con una precisione che era entro un quarto di punto della bussola, ossia entro $2^{\circ}.8$. Successivamente venne disegnato e installato un nuovo riflettore che è ora in corso di prova (fig. 12).

La fig. 10 mostra le curve polari rilevate recentemente con il nuovo riflettore. Le curve sono state misurate a una distanza di 4 miglia.

Con il fascio rotante non era facile giudicare a orecchio gli istanti esatti in cui i segnali raggiungono il massimo, ma è facile determinare gli istanti di inizio e di evanescenza dei segnali, poiché la velocità di comparsa e scomparsa degli stessi è estremamente elevata. L'istante intermedio fra questi due istanti coincide, con grande esattezza, con quello in cui il fascio è puntato verso la nave (fig. 11).

Per mezzo di un dispositivo a orologeria una lettera particolare è trasmessa ogni due punti di rotazione, mentre brevi segnali marcano i punti intermedi e i mezzi punti. Questo in pratica è realizzato mediante contatti disposti sulla base del riflettore rotante, così che un ben definito segnale caratteristico viene trasmesso ogni metà e ogni quarto di punto della bussola (fig. 12).

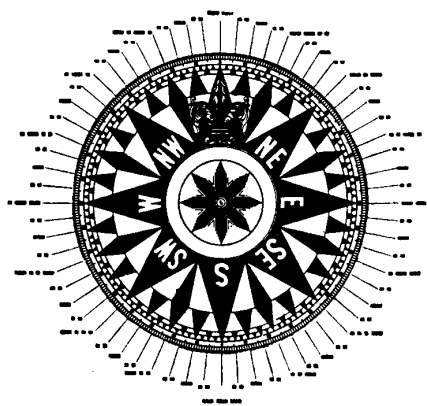


Fig. 11 – Rosa dei venti con lettere distintive per la radiolocalizzazione

Cercherò ora di mostrarvi il funzionamento di un trasmettitore e di un riflettore da un metro di lunghezza d'onda costruito in modo abbastanza rozzo (a questo punto il Senatore Marconi faceva una dimostrazione della trasmissione di onde continue da 1 metro, con un riflettore parabolico per il trasmettitore del tipo mostrato in fig. 3 e composto di fili paralleli, su una distanza approssimativamente di 15 metri dal tubo ricevente provvisto di riflettore simile a quello di fig. 2. Veniva altresì mostrato l'assorbimento delle onde da parte di un risuonatore accordato).

L'attenuazione di queste onde corte in mare è così sorprendentemente regolare, che un po' di esperienza consente di giudicare la distanza dalla intensità dei segnali, intensità che a sua volta può essere misurata per mezzo di un potenziometro.

Prima di concludere vorrei accennare a un'altra possibile applicazione di queste onde che, se avesse successo, potrebbe essere di grande aiuto per i naviganti.

Come venne mostrato per la prima volta da Hertz, le onde elettriche possono essere completamente riflesse da corpi conduttori. In qualcuna delle mie prove avevo notato gli effetti della riflessione e della deflessione di queste onde da parte di oggetti metallici posti a miglia di distanza.

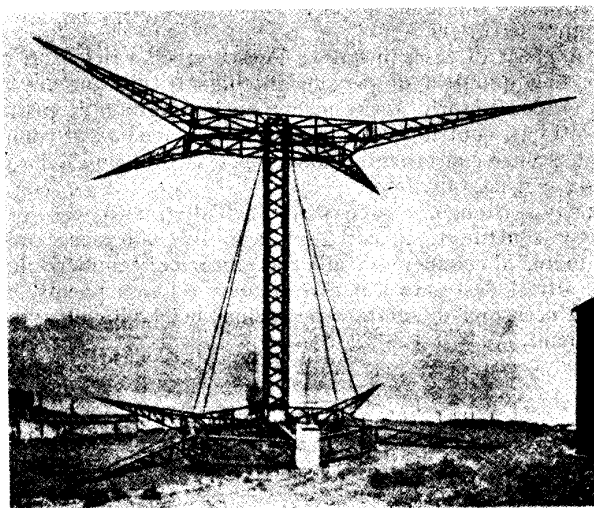


Fig. 12 – Inchkeith, trasmettitore direzionale rotante a onde corte.

Mi sembra che sarebbe possibile progettare apparati per mezzo dei quali una nave potrebbe irraggiare o proiettare un fascio divergente di questi raggi in ogni direzione desiderata. Questi raggi, qualora incontrassero un oggetto metallico, per esempio un altro piroscalo o un'altra nave, potrebbero essere riflessi indietro a un ricevitore, schermato dal trasmettitore locale, posto sulla stessa nave dove è installato il trasmettitore e rivelare allora immediatamente la presenza e il rilevamento dell'altra nave, e questo anche in caso di nebbia o scarsa visibilità. Un altro grande vantaggio di un tale apparato sarebbe il seguente. Esso

sarebbe in grado di dare un avvertimento della presenza e del rilevamento di navi, anche nel caso in cui queste navi fossero sprovviste di ogni tipo di radio.

Ho richiamato alla vostra attenzione questi risultati in quanto ritengo, e forse sarete d'accordo con me, che lo studio delle onde corte, benché deplorabilmente trascurato in passato, nel corso di tutta la storia della telegrafia senza fili, è ancora probabilmente da sviluppare in molte direzioni inaspettate e può aprire nuovi campi di utili ricerche.

Dopo aver parlato così a lungo di quello che è essenzialmente un sistema direzionale, e cioè un sistema che non diffonde le sue onde tutto intorno, voi forse vi aspetterete da me, prima che concluda questo discorso piuttosto lungo, almeno qualche parola sull'argomento della radiodiffusione.

Non è necessario alcun commento da parte mia o da parte di chiunque altro per dirvi che cosa è già stato fatto in America con la radio, intesa come mezzo per la diffusione della parola umana e di altri tipi di suoni, che possono anche essere divertenti, se pure non sempre istruttivi.

In migliaia di case, in questo Paese, vi sono ricevitori radiofonici e una quantità di persone intelligenti, giovani e vecchie, sono in grado di usarli - spesso sono anche in grado di costruirli - e in molti casi contribuiscono con utili informazioni al complesso delle conoscenze concernenti grandi e piccoli problemi della radiotelegrafia e della radiofonia.

Tuttavia ritengo, e sono sicuro nell'affermarlo, che la radio dopo aver contribuito in così grande misura alla sicurezza della vita in mare, al commercio e alle comunicazioni commerciali e militari, è altresì destinata a portare nuove, e fino a poco tempo fa insperate occasioni di salutare ricreazione nella vita di milioni di esseri umani.

(1) Tale onorificenza dava diritto al titolo di *Sir*, che Marconi, però non usò mai.

(2) A Oxford e a Cambridge.

(3) In ben nove Università della Gran Bretagna e degli Stati Uniti.

(4) *On undulator tape*: espressione oggi non più usata, si riferisce forse a un sistema di registrazione a penna scrivente, di tipo oscillografica.