

ALTÍMETROS Y RADIOLOCALIZADORES

Por EMILIO F. CASADO, Ingeniero de Telecomunicación.

La localización de aviones por medio de emisiones radioeléctricas reflejadas es ya hoy día un problema completa y prácticamente resuelto, tanto para la red de escucha antiaérea como para la dirección de los aviones de caza y la dirección del tiro arillero; incluso algunas experiencias recientes utilizan el método para lograr aterrizajes sin visibilidad.

Pero las naciones beligerantes guardan escrupulosamente el secreto técnico de las instalaciones. Lo que aquí dice el autor de este artículo no es, por tanto, más que suposiciones suyas, fundadas en su conocimiento técnico de la radioelectricidad y sus posibilidades generales. El mayor o menor acierto es, pues, puramente personal, sin que de ningún modo se apoye en el punto de vista del servicio oficial.

Entre los innumerables prodigios técnicos revelados en el transcurso de esta guerra mundial son, quizá, los más apasionantes por sus maravillosos resultados, propios de una moderna magia, los conseguidos por la radioelectricidad, una de cuya más brillante aplicación bélica la constituyen los aparatos denominados "radiolocalizadores".

Las recientes noticias que de estos nuevos inventos nos llegan, a través de periódicos y revistas, a raíz de sus primeras utilidades, se limitan, claro es, a confirmarnos su existencia, sin más detalles, guardados, como es natural, en el más hermético mutismo militar, pero que, no obstante, podemos afirmar, sin temor a equivocarnos, que sean cualesquiera los recursos empleados por los técnicos beligerantes para solucionar este tan complejo problema, su fundamento es análogo al de las ya antiguas sondas; esto es, la producción de una radiación apropiada al medio en que han de propagarse, seguida de su reflexión en el objeto a localizar y recepción subsiguiente del eco por ella producido.

El problema así presentado es sencillo, pues nos bastará medir el tiempo transcurrido entre la emisión del tren de ondas y la recepción del eco para, conocida la velocidad de propagación, deducir la presencia y la distancia de un objeto reflector; no obstante, veremos más adelante la dificultad de las cuestiones a resolver prácticamente, e indicaremos los métodos que nos parecen más probables en su utilización actual, para lo cual pasaremos una rápida revista a la evolución de los procedimientos de los cuales derivan, desde las antiguas sondas hasta los métodos más modernos.

Comenzó el estudio de estas cuestiones durante la pasada guerra europea (1914-1918), en la que por entablarse los duelos de artillería frecuentemente a larga distancia, resultaba más fácil la ocultación de las piezas, y entonces se pensó en recurrir para su localización a medios acústicos.

Entre los muchos sabios que entonces pusieron su ciencia al servicio de la Patria, se destaca M. E. Esclandon, profesor francés, como de uno de los principales investigadores de los fenómenos acústicos que acompañan al disparo de un cañón, consiguiéndose ya entonces diferenciar el "silbido" del proyec-

til, debido principalmente a los torbellinos aéreos que se originan en su parte posterior; la "onda balística", envolvente de las ondas que el proyectil crea en su marcha, y la "onda de boca", onda esencialmente esférica, producida por el mismo cañón, y que comenzando por una percusión manométrica (a la que se debe su sensación de detonación), va seguida de cierto número de oscilaciones lentas, que constituyen el "infrasonido", así llamado por no ser perceptibles al oído las oscilaciones de frecuencia inferior a 15 ni superiores a 30.000 ciclos por segundo, en cuyos límites se confunden las curvas de sensación dolorosa y de audibilidad de MM. Flohter y Wegel.

Nuestra onomatopéyica palabra PA-CO, tan empleada en la guerra de Africa, indica claramente la diferenciación anterior.

Dejaremos a un lado la técnica de los infrasonidos, que aunque de gran utilización en localizaciones, trabajos meteorológicos e investigación de las altas capas de la atmósfera, se basa en procedimientos manométricos.

Los ultrasonidos, producidos en un líquido, el agua de mar por ejemplo, se prestan a multitud de aplicaciones. A Richardson se debe el aprovechar la piezoelectricidad del cuarzo para su obtención y aplicación a la medida de profundidades, localización de submarinos, etc., siendo Langevin el verdadero realizador, quien consiguió aparatos tan perfectos que desterraron las antiguas sondas de percusión, fundadas en los ecos audibles, que aunque eficaces en la medida de grandes profundidades, no tienen, sin embargo, aplicaciones bélicas.

Al evolucionar la técnica aeronáutica se pensó en aplicar estos mismos principios en la determinación automática de la distancia entre un avión y el punto de tierra situado en su vertical, siendo Sadahiro Matsuo, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Tohoku, quien en 1930 realizó los primeros experimentos con tan buen resultado, que pronto se dotó a la aviación de todos los países de sistemas más o menos similares, conocidos con el nombre de "altímetros", algunos de los cuales describiremos brevemente.

Todos ellos deben dar automáticamente esta distancia, sin necesidad de desviar la atención del piloto, mediante una indicación muy visible y fácil de observar.

Entre los muchos métodos fundados en la radioelectricidad, merecen citarse los que se basan en variación de longitud de onda o de capacidad y los que utilizan ecos.

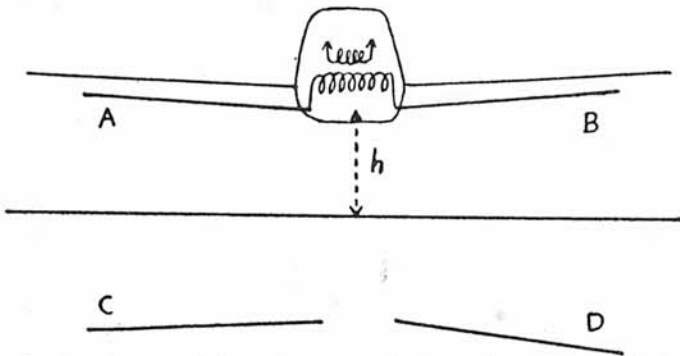


Fig-1

En cuanto a los primeros, sus principales estudios se deben a M. Mesny, quien comprobó que un oscilador (fig. 1) A-B, formado por un conductor, uniendo dos capacidades y situado a una altura h sobre el suelo (que supone perfectamente conductor), radiando, emite ondas que al reflejarse en la tierra hacen el mismo efecto que si radiase su imagen C-D, lo que produce una $f. e. m.$, que se añade a la del circuito oscilante, y ésta hace que varíen las condiciones de resonancia del circuito, dependiendo esta variación de la altura h . Así se llega a la fórmula que nos da la desintonía producida respecto al caso de estar el oscilador aislado en el espacio, y que es

$$df = - 10 \cdot \frac{Cl^2 f^3}{h} \cdot \cos 4 \pi \frac{h}{\lambda}$$

siendo

- c la capacidad al suelo,
- l la longitud de la antena,
- λ la longitud de onda de radiación (aislada en el espacio), y
- h la altura sobre el suelo,

expresadas todas las magnitudes en U. E. M.

De esta fórmula deducimos que si se ha regulado el emisor a una gran altura, a la frecuencia f_0 , ésta variará periódicamente al acercarse al suelo, tomando el mismo valor f_0 con intervalos de altura de $\frac{\lambda}{4}$, y los máximos sucesivos aumentarán cuanto menos alto vuele el avión.

Los altímetros, basados en la variación de capacidad, consisten en láminas metálicas colocadas en la parte inferior del avión, que forman con la superficie del suelo, supuesto conductor, un condensador que forma parte de un circuito oscilante, y que al aproximarse el aeroplano a tierra varía esta capacidad, y, por tanto, la frecuencia propia del circuito cambia con esta proximidad de una manera continua. Aunque este sistema ha sido de los más experimentados en muchos países, tanto éste como el anterior adolecen del grave defecto de la pequeñez de las variaciones que producen, que son del orden de las que por múltiples efectos pueden sufrir los res-

tantes elementos de los circuitos, por lo que no ofrecen ninguna garantía.

Mayor utilidad han conseguido los últimos de nuestra clasificación, mediante el uso de ondas acústicas sónicas y supersónicas u ondas electromagnéticas.

El empleo de ondas acústicas presenta dos inconvenientes fundamentales. El primero es, que dado el nivel elevadísimo de ruidos a bordo de un avión, debidos a los motores, hélices y a toda clase de trepidaciones a que está sometido, sería necesario emplear ondas sonoras de gran intensidad para que el eco no quedase completamente enmascarado.

En efecto, para comprobar la pequeñez de la amplitud de la onda recibida, basta recordar que si S es el área de la membrana vibrante, f la frecuencia de la vibración, ρ la densidad del aire, a la amplitud y v_0 la velocidad de la propagación del sonido en el aire, de las ecuaciones de la propagación, que para simplificar suponemos se verifican en un gas perfecto, con movimientos de las partículas de pequeña amplitud y transformaciones adiabáticas, o sean:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= - \frac{P_0}{\rho_0} \cdot \gamma \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= - \frac{P_0}{\rho_0} \cdot \gamma \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial y} & \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \text{div. } v &= 0, \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= - \frac{P_0}{\rho_0} \cdot \gamma \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial z} \end{aligned}$$

omitiendo cálculos para no cansar a nuestros lectores, llegamos a la fórmula de la potencia emitida

$$W = 2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot \rho \cdot v_0 \cdot a^2 \cdot S;$$

y si, por ejemplo,

$$\begin{aligned} n &= 50.000 \text{ cms/seg.} \\ \rho &= 1 \\ v_0 &= 33.000 \text{ cms/seg.,} \end{aligned}$$

será

$$a^2 = \frac{1}{16 \cdot 10^{14}} \cdot \frac{W}{S}$$

En la que si

$$W = 10^7 \text{ erg/seg.} \quad \text{y} \quad S = 1 \text{ cm}^2$$

$$a = 10^7 \cdot \frac{1}{16 \cdot 10^{14}} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ cms.};$$

y al incidir la onda sobre el suelo, si éste fuese perfectamente reflector, el punto de incidencia (que consideramos único) obraría como difusor (fig. 2), siendo éste centro de otra onda

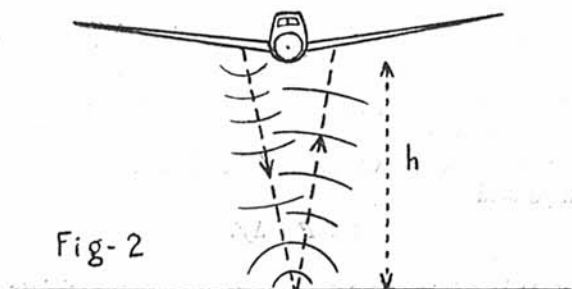


Fig-2

esférica, de la cual sólo llegaría al receptor la energía concentrada solamente en el ángulo sólido, bajo el cual se ve la membrana receptora desde el punto reflector; si a esto añadimos que el suelo no es perfectamente rígido para las ondas sonoras, se comprende que en el choque se perderá energía por absorción, y la amplitud reflejada será ka , siendo k el coeficiente de absorción siempre menor que la unidad.

Otro inconveniente fundamental es que la velocidad del sonido en el aire es demasiado pequeña en comparación con la de desplazamiento de los modernos aviones. Si, por ejemplo, el avión vuela a 30 metros sobre el suelo (notemos que hacemos el cálculo a esta pequeña altura, pues es cuando realmente tiene utilidad este tipo de altímetros, ya que para grandes distancias del suelo se dispone de los altímetros barométricos), el tiempo tardado en recibir el eco desde el momento de emitir la onda es

$$t = \frac{2h}{330} \approx 0,18 \text{ seg.},$$

en cuyo tiempo el avión ha podido recorrer un espacio del orden de

$$e = 600 \cdot \frac{0,18}{3.600} = 30 \text{ metros},$$

pudiendo, por la configuración del terreno, encontrarse a una distancia de tierra completamente distinta de la leída en el aparato.

Con objeto de evitar estos inconvenientes se pensó en sustituir la onda sonora por una electromagnética, cayéndose entonces en el extremo opuesto, pues el tiempo transcurrido entre la emisión y consiguiente recepción del eco es demasiado pequeño, encerrando considerables dificultades su medida.

Modernamente se ha obviado este inconveniente recurriendo a medidas indirectas del tiempo, tales como medir frecuencias.

Para ello a bordo del avión se hace funcionar un transmisor de onda ultracorta, que emite un haz dirigido hacia el suelo, no siendo la frecuencia de la emisora constante, sino modulada linealmente en frecuencia, lo que puede conseguirse, bien mediante sistemas mecánicos, tales como condensadores de perfil de armaduras de variación lineal, con la frecuencia y giratorios para conseguir continuidad en el funcionamiento, o bien por aplicación de las propiedades de la "válvula de reacción", tan en boga ya en U. S. A.

De esta forma, cuando la señal reflejada vuelve al avión, la frecuencia del transmisor es distinta de la recibida, siendo su diferencia proporcional al tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción, o sea a la altura del aeroplano. Heterodinando ambas, obtenemos a la salida una frecuencia igual a su diferencia, que ya se puede leer en un frecuencímetro de lectura directa, calibrado en alturas.

Con objeto también de obtener continuidad en esta variación de frecuencias del emisor, se adopta como ley (fig. 3) de variación la triangular. Si Δf es la diferencia de frecuencias entre los valores $f_{m\acute{a}x}$ y $f_{m\acute{i}n}$ y F , el número de ciclos de variación por segundo, la variación de la frecuencia por unidad de tiempo será

$$2 \cdot F \cdot \Delta f.$$

Si h es la altura sobre el terreno del aparato, el intervalo

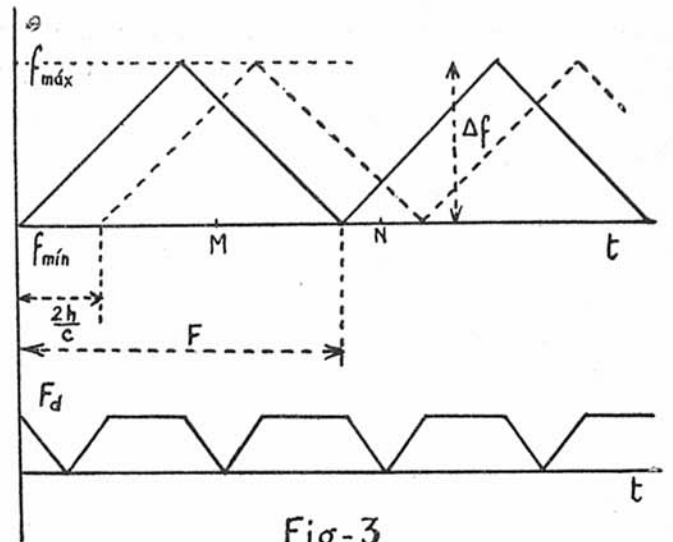


Fig-3

de tiempo entre la emisión y la llegada del eco será, siendo c la velocidad

$$\left(c = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \right)$$

de propagación, o sea

$$\frac{2h}{c}.$$

Por tanto, la f de la señal reflejada en cada momento será la indicada en la línea de puntos de la figura, que es la misma línea llena defasada el intervalo

$$\frac{2h}{c}.$$

La diferencia entre las dos frecuencias es constante e igual a

$$F_d = \frac{4 \cdot h \cdot F \cdot \Delta f}{c}.$$

En los puntos M y N las dos frecuencias son iguales y su diferencia será cero; la salida del receptor sigue la ley indicada en la curva inferior de la misma figura. Si $F_d \gg F$, las interrupciones periódicas que se observan no influyen en el funcionamiento del frecuencímetro, pero si F_d y F son del mismo orden, y en particular no podemos apreciar frecuencias inferiores a F , lo que impone un límite mínimo de las alturas que pueden medirse, por lo que con objeto de reducir ésta conviene hacer F grande y F_d pequeño, y Δf , por tanto, lo mayor posible.

Actualmente se construyen aparatos de este tipo, con los que se pueden medir alturas superiores a seis metros, en los que la frecuencia media del emisor es de 450 megaciclos/segundo y $\Delta f = 25$ Mcs., lográndose en terrenos relativamente lisos exactitudes del orden de ± 10 por 100. En los irregulares y montañosos pueden resultar interferencias entre rayos reflejados en diferentes puntos, y el aparato tenderá a darnos lecturas demasiado bajas; también a grandes alturas su funcionamiento es precario, pero recordemos que entonces no se hace uso de él.

Los "radiolocalizadores", indiscutiblemente fundados en procedimientos análogos a los descritos, esto es, repito, radia-

ción de una onda, y luego captar la reflejada por el obstáculo a localizar, presentan gravísimos inconvenientes de orden práctico, y es que la energía reflejada por un avión es insignificante, agravado esto por la distancia a que será práctica esta localización.

Como consecuencia se deduce que las potencias de emisión han de ser grandes, y los receptores utilizados, de una sensibilidad exquisita, y viniendo ésta limitada por los "ruidos", tanto debidos a las válvulas como a los circuitos de entrada del mismo receptor, que vienen expresados en la fórmula deducida de otra de Nyquist,

$$e_{ef} = \lambda \sqrt{4KT \cdot \Delta f} \cdot \sqrt{R_d} \cdot \sqrt{2 \left(1 + \frac{R_r}{R_d}\right)},$$

y que nos dice cuál debe ser la señal mínima a recibir para que posea una relación λ , señal útil/ruido de fondo (unos 15 a 20 decibels), siendo R_r la resistencia equivalente respecto a ruidos a la válvula; R_d la resistencia equivalente en cuanto a ruidos del circuito de rejilla de la primera lámpara; Δf la banda de selectividad; K la constante de Boltzman, y T la temperatura absoluta.

Se deduce, pues, hemos de elegir receptores de baja R_d y muy alta R_r/R_d .

Prácticamente es casi imposible calcular la potencia que nos va a llegar por el eco, pero se estima una relación de

$$\frac{\text{Potencia radiada}}{\text{Potencia recibida}} = 10^{20}.$$

Aun en el caso de radiar grandes potencias, existe el problema de evitar que la onda emitida no nos prive de sensibilidad en el receptor, y veremos a continuación los procedimientos que podrían utilizarse para solucionarlo.

Otro problema que se presenta es el de la elección de la onda a emplear. Si λ es grande respecto a las dimensiones del avión, nos devolverá una energía muy pequeña, yendo ésta en aumento a medida que λ disminuye, disminuyendo luego a raíz de las dimensiones del avión, por lo que convendrá elegir una λ del orden de las dimensiones de éste, y parece ser se utilizan las $\lambda = 10$ metros, que además gozan de buenas condiciones de propagación, aun con tiempo brumoso.

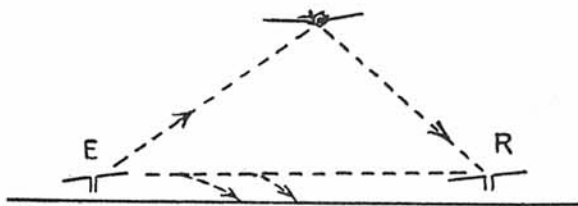


Fig-4

Entre los métodos que pueden adoptarse para no perjudicar la sensibilidad del receptor (fig. 4), uno puede ser la separación a una distancia de 20 a 30 kilómetros entre el emisor y el receptor, viniendo así la onda directa amortiguada por la distancia y absorción del suelo, y constituyendo las antenas, por ejemplo, por dipolos horizontales del tipo de los empleados en el "aterizaje a ciegas". El rayo indirecto, o sea el que

se refleja al viajar a gran altura sobre el suelo, no sufre la absorción de éste, atenuándose únicamente, inversamente proporcional al camino recorrido, salvo, claro está, la parte absorbida y no reflejada por la masa del avión, que será tanto menor cuanto más metálico sea éste.

Si el obstáculo reflejado fuese fijo en el espacio, nos produciría una interferencia constante que no se sabría interpretar; pero dado el movimiento del avión se produce un fenómeno análogo al efecto Doppler, esto es, que cuando el foco emisor está en movimiento respecto al punto de observación, hay una variación de λ debida a este movimiento, y por tanto, de esta diferencia de frecuencia entre el rayo directo y el reflejado podemos obtener unos batimientos posibles de apreciar, y siendo aquí este efecto reducido (sólo de algunos ciclos), el mejor aparato registrador será el oscilógrafo.

El sistema así concebido sólo sirve para indicar la presencia de masas metálicas en el aire, pero en cambio tiene la gran ventaja de que como el fenómeno es de muy baja frecuencia, se limita la banda del receptor a una centena de ciclos, y ya sabemos la importancia que esto tiene, como hemos visto en el nivel de ruidos, dándonos, por tanto, gran sensibilidad con una potencia de emisión relativamente baja (200 a 500 w.).

Otro método consiste en el funcionamiento, próximos el emisor y receptor, emitiendo el primero periódicamente trenes de ondas cortísimas del orden de los microsegundos, para localizaciones a distancias medias, o de 0,1 de microsegundo para las cortas, y así, cuando llega la onda reflejada, ha cesado ya el impulso emisor, estando el receptor ya libre del impulso buital de éste.

Este funcionamiento tan especial requerirá el empleo de válvulas adecuadas, ya que existe una gran diferencia entre la potencia que deben suministrar en el pico del impulso y su potencia media, y las válvulas corrientes sabemos viene limitado su uso por esa potencia media que debe ser compatible con la que pueden disipar en placa. Con estos tubos especiales debe llegarse hasta 1.000 kilovatios instantáneos en el momento de emisión en una onda del orden ya dicho de los 10 metros.

El indicador, debido a ser estos impulsos de emisión tan breves y breves, ha de ser necesariamente el tubo de rayos catódicos, en el que se aplica a un par de placas desviadoras el voltaje de salida del receptor y al otro un voltaje de rela-

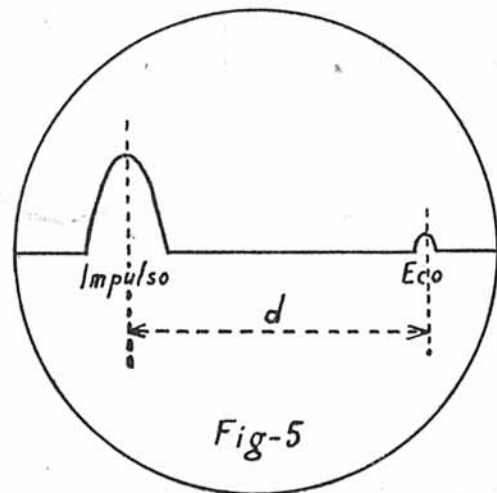


Fig-5

jación del tipo de dientes de sierra, pero separados estos dientes y siendo el voltaje algo mayor del corrientemente empleado en televisión.

Empleando este sistema a grandes distancias, el tiempo transcurrido entre la emisión del impulso y la recepción del eco es menor que el tiempo transcurrido entre dos impulsos sucesivos. Así un oscilograma de localización puede ser el de la figura 5.

Siendo la oscilación de relajación rectilínea, esta d del oscilograma podría calibrarse directamente en distancias mediante una cuadrícula apropiada.

Este sistema requiere el empleo de más potencia que el anterior, así como más anchura de banda.

Del estudio de estos oscilogramas parece ser se han conseguido deducir posición, velocidad, dirección, etc., de aviones en vuelo enemigos, y conocido es el caso de Pearl-Harbour, donde un radiotelegrafista norteamericano pudo, no sólo detectar, sino hasta contar el número de aviones japoneses que se acercaban a bombardear, indicando el aparato después del ataque el amplio semicírculo que éstos describieron hacia el Norte.

Los países beligerantes han debido conseguir una gran precisión en el empleo de estos radiolocalizadores, sobre todo a pequeña distancia, de los cuales deben de poseer verdaderas redes, y hasta parece han conseguido servir por medio de estos aparatos la dirección automática del tiro de la artillería anti-aérea, base a lo que parece del éxito de la D. C. A. alemana.

