

Altimetro "radar" de frecuencia modulada

A. SANZ

(Recopilado de *Electronics*)

En 1938, la Compañía comercial United Airlines hizo una demostración ante los periodistas de un radioaltímetro creado por los laboratorios de la Bell Telephone, y que daba a conocer la altura a que volaba un avión sobre el terreno, sincronizando una radio-onda reflejada. Aún no se había inventado la palabra "radar", y el principio empleado en el altímetro era distinto del de impulsos, que se estaba desarrollando con el mayor secreto. No se facilitó información técnica; pero el principio general del funcionamiento se descubrió en varias revistas técnicas. Poco después, la censura prohibió que se diesen más detalles.

Hoy día es posible hacer una descripción detallada de un altímetro "radar" de frecuencia modulada, después de haber sido dado de baja el altímetro modelo "AN/APN-1". Este altímetro fué instalado durante la guerra en más de cien mil aviones del Ejército y de la Armada. El "APN-1", que funciona siguiendo los mismos principios que el equipo anteriormente citado, fué proyectado para que lo construyese la fábrica de la R. C. A. en Camden. El altímetro es uno de los dos que utilizó ampliamente la Aviación norteamericana durante la guerra (el otro utiliza el principio de impulso reflejado), y se espera que se empiece a instalar en los aeroplanos comerciales, pues ha sido aprobado recientemente por la Administración de Aeronáutica Civil.

El "radar" de modulación de frecuencia determina la distancia que existe hasta una superficie de reflexión (en este caso, el terreno que hay debajo del avión), midiendo el cambio de frecuencia entre las ondas transmitidas y reflejadas. Mientras la onda viaja hasta la superficie del terreno y regresa, la frecuencia del transmisor se modifica bajo la influencia de la modulación de frecuencia. Cuando la onda reflejada llega de nuevo al transmisor, su frecuencia es ligeramente distinta que la de la onda que se está transmitiendo en ese momento. Las señales transmitida y reflejada se combinan en un detector, y la diferencia de frecuencia entre ellas se convierte en una nota. Esta diferencia de frecuencia aumen-

ta a medida que se hace mayor la distancia hasta la superficie de reflexión. La altura se indica transformando la frecuencia de batimiento en una indicación de distancia.

La ventaja de este método estriba en que con él es posible medir distancias muy cortas, que llegan hasta unos pocos metros. La distancia mínima de detección con el método de impulso está limitada por la longitud de dicho impulso. Aun cuando se use un impulso tan pequeño como 0,2 de microsegundo, el alcance mínimo es de 30 metros. Por tanto, el "radar" de impulso no puede indicar la altura durante los aterrizajes cuando la distancia a que se encuentra el aeroplano sobre el suelo debe indicarse con precisión desde un centenar de metros hasta cero. Para indicar alturas mayores, el método de impulso resulta muy útil y se ha empleado mucho en los instrumentos para vuelos a grandes alturas.

Una desventaja del principio de modulación de frecuencia es que un altímetro proyectado para dar sus indicaciones a poca altura no puede indicar alturas muy grandes sin deducir la desviación de la modulación de frecuencia. Por tanto, se requieren dos escalas para abarcar todas las alturas de funcionamientos, y en los equipos antiguos había la posibilidad de que el hombre se equivocase al elegir la escala correcta. En los modelos posteriores, el equipo se encargaba de impedir este tipo de error.

De la figura 1 pueden deducirse las relaciones cuantitativas que regulan el proyecto de un altímetro "radar" de frecuencia modulada. En la parte superior de la

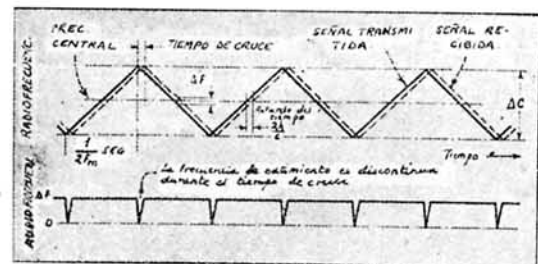


Figura 1.

figura se trazan las frecuencias de las ondas transmitida y recibida como funciones del tiempo. La línea de trazo grueso representa la frecuencia transmitida, que es modulada por la onda lineal triangular. La desviación total de la modulación de frecuencia (el valor de cresta a cresta de la envolvente de modulación) se indica como ΔC megaciclos. En el equipo "APN-1", el centro de frecuencia son los 440 mgcs., y la desviación es más o menos 20 megaciclos ($\Delta C = 40$ mgcs.) en la escala de altura menor.

La línea de rayas de la figura 1 representa la señal recibida. Desde luego, la frecuencia de esta señal es modulada por la misma envolvente, puesto que dicha señal conserva su forma durante la reflexión; pero la señal recibida está desplazada en el tiempo por el intervalo de reflexión, que es igual a $2h/c$, donde h es la altura del avión sobre el terreno, en metros, y c la velocidad de la propagación de las radioondas en metros por segundo. Como consecuencia de este desplazamiento del tiempo, se produce el correspondiente desplazamiento de la frecuencia, indicado por la separación vertical Δf entre las líneas de trazo continuo y de puntos.

La relación entre la altura h y la diferencia de frecuencia Δf puede hallarse mediante comparación de triángulos semejantes en la figura. La altura de la onda triangular es ΔC , y la mitad de su base es $1/(2f_m)$, donde f_m es la frecuencia de la envolvente de modulación. La relación entre la altura y la mitad de la base es $2\Delta C f_m$, y ésta es igual a la diferencia de frecuencia dividida por la diferencia de tiempo:

$$2 \Delta C f_m = \frac{\Delta f}{\Delta t/c} \quad (1)$$

donde ΔC , f_m y Δf se miden en c. p. s. La relación entre la diferencia de frecuencia y la altura se halla después, simplificando la ecuación (1):

$$\frac{\Delta f}{h} = \frac{4 \Delta C f_m}{c} \quad (2)$$

Se observará que la sensibilidad de la indicación en c. p. s. de diferencia de frecuencia por metro, puede aumentarse empleando una mayor desviación de la frecuencia, una frecuencia más alta de modulación, o ambas cosas a la vez. En el equipo "APN-1",

ΔC es de 40 mgcs., f_m es de 120 c. p. s., y c es de 984×3^6 metros por segundo, y, por tanto, $\Delta f/h$ es de 63 c. p. s. por metro de altura.

Así, pues, parece ser que en la nota de batimiento aparecen audiodfrecuencias hasta de 7.600 c. p. s. entre las señales transmitida y recibida, siempre que las alturas no sean superiores a los 120 metros. Para alturas mayores, hasta los 1.200 metros, se introduce una menor desviación de frecuencia, $\Delta C = 4$ mgcs., y de esta forma disminuye la frecuencia de batimiento hasta 6,3 c. p. s. por metro. Entonces, la frecuencia máxima de batimiento creada es la misma ($1.200 \times 6,3 = 7.600$ c. p. s.).

Durante el período entre la inversión de la desviación de la frecuencia transmitida y la correspondiente inversión de la onda recibida aparece una aberración secundaria, como representa la figura 1. En el centro de este período, la frecuencia transmitida baja hasta un valor igual a la señal recibida, que en ese momento aún continúa aumentando. Por tanto, en este instante la nota de batimiento es nula. Durante este intervalo de cruce la frecuencia de batimiento es variable, disminuyendo hasta cero en el centro. Sin embargo, la duración del intervalo de cruce sólo es de 20 microsegundos a la altura máxima de 1.200 metros, en comparación con los 42.500 microsegundos del semiperíodo de la envolvente de modulación. En consecuencia, el efecto de cruce es despreciable.

En la práctica no es conveniente modular la frecuencia con una envolvente triangular, por lo que se sustituye por una envolvente sinusoidal. Entonces se crea la situación que refleja la figura 2. La diferencia de frecuencia ya no es constante entre los cruces, sino que varía de la forma indicada, desde cero en el cruce hasta un máxi-

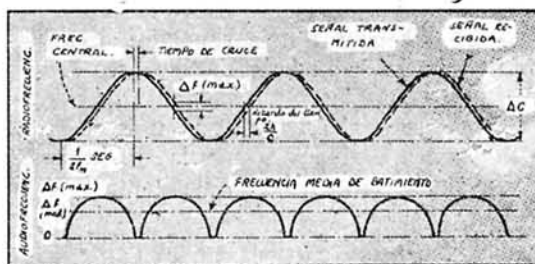


Figura 2.

mo, que tiene lugar cuando la frecuencia transmitida pasa por su valor central. Mediante circuitos que describiremos más adelante, se mide la frecuencia media de batimiento, y este valor corresponde con el producido por la modulación triangular. Puede utilizarse la ecuación (2) para predecir la frecuencia media de batimiento, Δf , cuando se utiliza la modulación sinusoidal.

Al instalar el equipo de un avión hay que tener cuidado de igualar los retardos residuarios entre las entradas de transmisión y recepción y el detector de la nota de batimiento. La distancia entre las entradas no es cero cuando las ruedas del avión se hallan en tierra, sino que es igual a la suma de las longitudes de conductores entre el detector y las dos antenas, más la distancia física de reflexión (que no llega un metro) entre las antenas y el terreno a la mitad de la trayectoria entre ellos. Este error residuario de altura se elimina al calibrar el instrumento.

Cuando el avión vuela sobre un terreno muy llano, tal como una carretera o una superficie de agua, puede aparecer un error final. En estas condiciones, los cambios indicados de frecuencia de batimiento oscilan en una cifra equivalente a 1,80 metros cuando la altura real se modifica en 15 centímetros (un cuarto de la longitud de onda en los 440 mgcs.). Cuando el terreno es accidentado (protuberancias superiores a los 15 centímetros) se saca el promedio del cambio de frecuencia, y la altura indicada es valor correcto. El cambio de altura (conocido como error fijo) puede reconocerse con rapidez, y el valor correcto es el intermedio entre los límites extremos del cambio.

Disposición general del equipo del "APN-1"

La figura 3 representa un esquema de los elementos esenciales del altímetro "APN-1". El modulador está mandado por un oscilador de audiofrecuencia, acoplado por transformador, que funciona en 120 c. p. s. Es un modulador mecánico, que se parece al conjunto de bobina móvil de un altavoz dinámico. El elemento móvil del modulador manda una de las placas de un condensador compensado que hay en el circuito tanque del transmisor, produciendo así una salida de frecuencia modulada. Hay dos amplitudes distintas de mando: una, para una

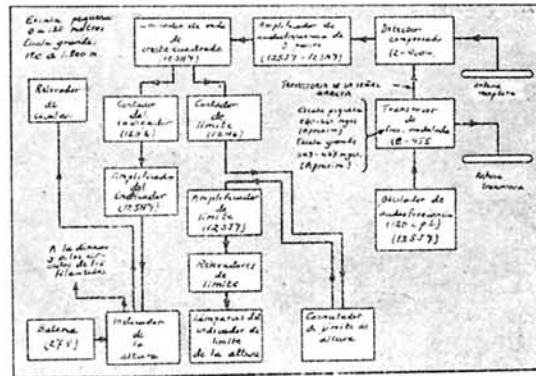


Figura 3.

desviación total de 40 mgcs. (escala de poca altura), y la otra, para la desviación reducida de 4 mgcs. (escala de gran altura).

El transmisor es un oscilador en contrafase, de control lineal, que emplea dos triodos de bellota tipo 955. El transmisor tiene una salida de potencia de unos 100 milivatios, con una frecuencia central de 440 megaciclos. Parte de la señal transmitida pasa a una dipolo transmisora, montada bajo una de las alas del avión. Otra parte de la señal se inyecta directamente en el detector del receptor.

El extremo de entrada del receptor es un detector en contrafase, compensado, que emplea dos diodos de bellota, tipo 9.004. El detector compensado mezcla las señales recibida y transmitida. Estas señales se aplican, respectivamente, en "push-push" y "push-pull", montaje que evita el acoplamiento mutuo entre las dos señales. La conexión en "push-push" es una varilla situada en el centro, entre dos conductores del circuito sintonizado del detector, y la conexión en "push-pull" es un rizo de acoplamiento. El circuito del detector está compensado mediante señales de amplitud modulada, y, por tanto, discrimina las variaciones de amplitud introducidas por el paso de las señales de frecuencia modulada a través de las zonas de resonancia de los circuitos sintonizados y antenas. La figura 4 representa los detalles del detector.

La salida de audiofrecuencia (nota de batimiento) del detector se pasa a un amplificador de audio de tres pasos, que tiene la característica de respuesta de frecuencia que aparece en la figura 5. Las componentes de baja frecuencia están atenuadas,

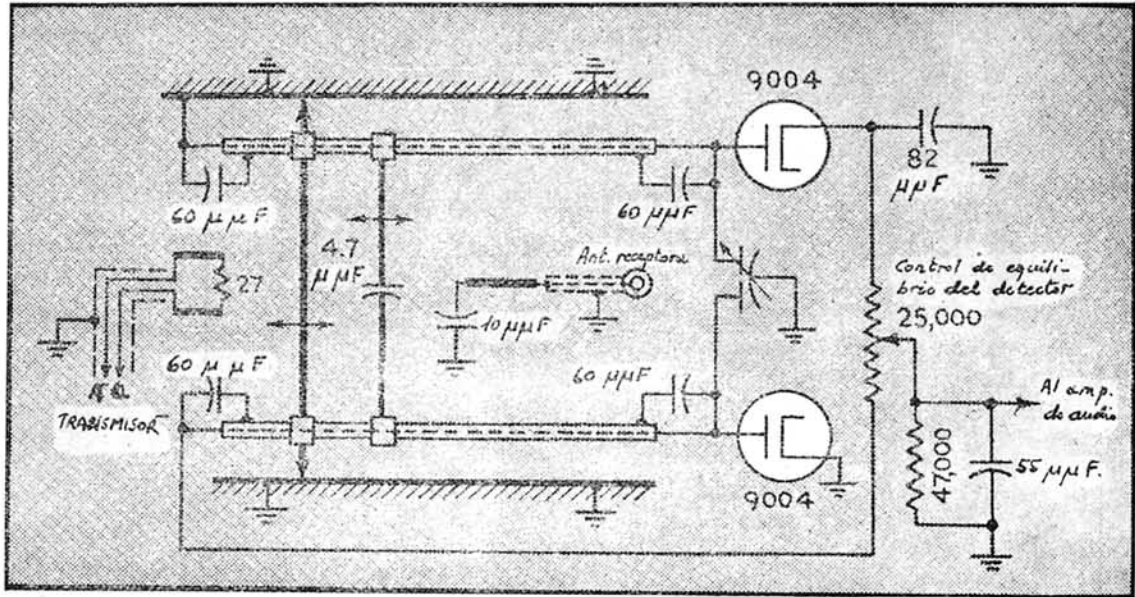


Figura 4.

puesto que la modulación de amplitud debida a los efectos de resonancia es máxima en la frecuencia de modulación (120 c. p. s.), y en sus armónicos, más bajos. La característica de ganancia también es igual a la amplitud de la nota de batimiento como función de la altura, puesto que la señal recibida es máxima cuando el avión está cerca de tierra y la nota de batimiento tiene sus valores máximos. La ganancia de A. F. continúa aumentando por encima de los 7.600 c. p. s., que es la frecuencia máxima de la nota de batimiento. La gran salida del amplificador hace que el indicador de altura se salga de la escala cuando la altura excede, respectivamente, de los

120 y 1.200 metros en las escalas de poca y mucha altura. La característica de frecuencia representada se obtiene empleando reacción especial. El amplificador tiene un montaje a prueba de choques y está blindado contra la captación de radiofrecuencias procedentes de otros equipos.

La salida de audiofrecuencia del amplificador se convierte en la correspondiente señal de c. c. para la indicación de la altura. Esta señal también actúa sobre relevadores de límite, que indican las desviaciones de una altura asignada o para controlar el piloto automático. El proceso de conversión empieza en un paso limitador, que convierte la salida sinusoidal de batimiento (que varía de frecuencia según la figura 2) en una onda rectangular con una amplitud de 135 V. de cresta a cresta. El fin de este limitador es eliminar las variaciones de amplitud que pudieran persistir y suministrar crestas pronunciadas con las que puede contarse para determinar la frecuencia media de la nota de batimiento. El paso limitador, que es un amplificador con exceso de mando, limita las crestas positivas mediante corriente de rejilla, y las negativas, mediante corte de la tensión de rejilla.

La salida del limitador pasa a dos contadores, que determinan la frecuencia media de la nota de batimiento contando las

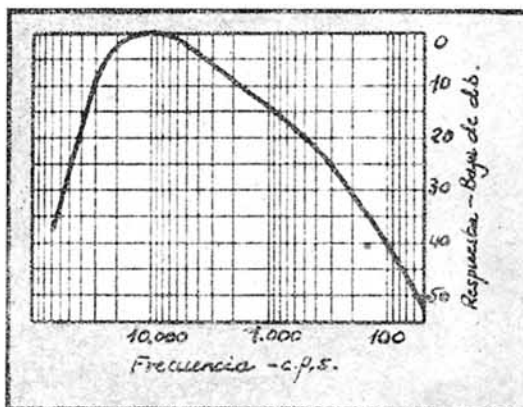


Figura 5.

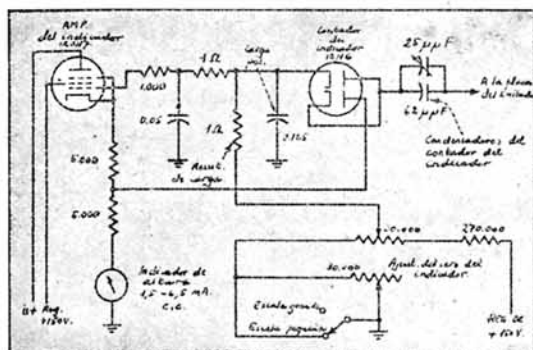


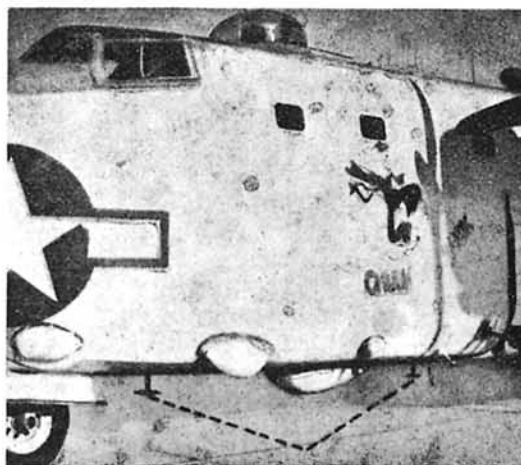
Figura 6.

ondas rectangulares. El primer contador actúa sobre el indicador de altura. Este circuito (figura 6) consta de una doble diodo. Una sección de la diodo admite al semiperíodo positivo de la salida del limitador, cargando un condensador y una resistencia de carga en derivación. Los valores del condensador y resistencia se eligen de tal forma que la carga del condensador escapa por la resistencia con un ritmo similar a la conducción de carga a través de la diodo. Por tanto, cuando las ondas positivas rectangulares llegan con un ritmo más rápido (nota más elevada de batimiento), la tensión continua, a través del condensador, tiende a aumentar, y viceversa. Esta tensión se aplica a un filtro de paso bajo, RC, que promedia la tensión continua y la aplica a la rejilla de la amplificadora de salida. Un miliamperímetro, situado en el cátodo de esta última, registra en una escala de cinco miliamperios el valor medio de la tensión continua en la rejilla. Este aparato de medición está calibrado directamente en metros, desde cero hasta 120 y desde 120 a 1.200. La escala indicada está conectada en sincronía con el conmutador que controla la desviación total de la señal transmitida; así, que no es posible tomar lecturas erróneas.

Una parte de la tensión de la resistencia catódica se envía por reacción a la otra sección de la diodo, en el circuito del contador. Esta diodo envía los semiperíodos negativos de la salida del limitador a tierra, y esto descarga el condensador de acoplamiento, dejándolo dispuesto para recibir el siguiente semiperíodo positivo. La reacción del amplificador de salida polariza la diodo y aumenta la linealidad de la indicación.

Un circuito contador similar se emplea para accionar los relevadores de límite. Sin embargo, en este caso se invierte la polaridad de las diodos y se origina una tensión negativa en la resistencia de carga. La amplitud de esta tensión es considerablemente proporcional a la frecuencia de la salida del limitador, y, por tanto, a la altura.

La tensión del contador se pasa a la rejilla de un paso de pñtado autopolarizado. Los relevadores del circuito de placa de esta válvula se accionan cuando la corriente de placa excede de ciertos límites. El operador es quien fija estos límites aplicando un potenciómetro, que ajusta la polarización del paso amplificador. Este potenciómetro está marcado en metros, y se coloca en la altura a que se desea volar. Los relevadores permanecen en su posición normal si el avión se mantiene dentro de los tres metros de la altura elegida. Si dicha altura se desvía en más de esta cifra, el circuito del contador disminuye o aumenta la polarización en una cantidad suficiente para accionar el relevador correspondiente. Estos relevadores controlan tres lámparas. Una, de color blanco, se enciende cuando los relevadores están en posición normal (altura dentro de los tres metros del valor previamente seleccionado). Cuando la altura es inferior a la mínima fijada, se enciende una lámpara roja, y cuando la altura es superior a la máxima fijada, se enciende una lámpara verde. Se dispone de los correspondientes impulsos de tensión para controlar



Instalación de las dipolos del altímetro "radar" bajo el fuselaje de un "Consolidated Privateer" (PB4Y-2).

