

Esquema de la amplitud del eco de la Luna tomado al salir nuestro satélite el 22 de enero de 1946.

Descripción detallada de la técnica empleada en la primera transmisión de radio realizada a través del espacio exterior. Los cálculos demuestran que el alcance máximo del "radar" del Cuerpo de Transmisiones del Ejército americano, que envió señales hasta la Luna, excede de 1.600.000 kilómetros.

(Traducida y comentada por BRAMTOT, de *Electronic*.)

Los experimentos de que nos ha informado la Prensa española no hace mucho, en los que el Laboratorio de Ingeniería del Cuerpo de Transmisiones del Ejército americano ha conseguido hacer reflejar señales de "radar" en la Luna, han dado origen a múltiples comentarios entre los ingenieros, astrónomos y demás profesionales dedicados a actividades técnicas. Aunque los aspectos científicos de la transmisión de señales de radiofrecuencia a través de la ionosfera tienen una gran importancia, la labor realizada en este proyecto se clasifica mejor como un triunfo de la Ingeniería aplicada. Así, pues, en este artículo nos limitaremos a las características técnicas y a la descripción general del equipo utilizado.

En resumen, el experimento consistió en enviar en dirección a la Luna impulsos de energía de radiofrecuencia de 111,5 mcs., que tenían una duración de un cuarto de segundo, y detectar su eco, aproximadamente, dos y medio segundos después de transmitidos. La comprobación de las señales detectadas fué audible y visible. En el experimento se usó la conocida técnica del "radar", pero con constantes radicalmente dis-

tintas en todo el sistema. Teniendo en cuenta la anchura del impulso, la anchura de banda del receptor, la potencia del transmisor y la frecuencia precisa de la señal de retorno, a causa del efecto de Doppler, hubo de prestarse especial atención al proyectar todo el grupo emisor receptor.

Una vez que se hicieron los cálculos preliminares respecto a la potencia del transmisor, al coeficiente de reflectividad de la Luna y al nivel de ruido del receptor, se pudo ver que la recepción de ecos de "radar" procedentes de nuestro satélite era técnicamente posible. Bajo la dirección del Teniente Coronel John H. De Witt, se creó en septiembre de 1945 el "proyecto Diana" para crear un sistema de "radar" capaz de transmitir impulsos de R. F. hasta la Luna y detectar sus ecos más de dos segundos después. Antes de ingresar en el Cuerpo de Transmisiones, el Teniente Coronel De Witt (que en aquella época era ingeniero jefe de la emisora WSM, de Nashville, Tenn.) ideó y construyó un equipo transmisor y receptor con objeto de recibir ecos procedentes de la Luna. Este equipo empleaba una potencia y frecuencia de trans-

misión similares a las del utilizado por el Cuerpo de Transmisiones; pero la tentativa fracasó porque el receptor no tenía suficiente sensibilidad. La idea del problema que tenía el Teniente Coronel De Witt y su dirección personal fueron las causas del éxito que tuvo el experimento. En su labor le ayudaron: E. K. Stodola, el doctor Harold D. Webb, Herbert P. Kauffman y Jack McFenson; todos ellos de los Laboratorios Evans. También prestaron su valiosa ayuda la Sección de Antenas, la de Mecánicos, la de Investigaciones, la de Estudios Teóricos y otras ramas del Laboratorio de Transmisiones.

Las consecuencias prácticas del contacto por

de radio a grandes alturas para la detección y control de tales armas, se convierte en un problema militar de primordial importancia. Además, el empleo de un reflector muy alejado de la Tierra permite que se efectúen mediciones directas de la capacidad de las ondas de radio para penetrar en la ionosfera. Así, pues, resulta útil una investigación en ese sentido. También se estudia la posibilidad de utilizar la Luna como escala para un sistema parcial de comunicación a gran distancia y como objetivo para efectuar mediciones de las distintas distribuciones de la resistencia de campo.

Determinación de los requisitos necesarios.— Entre las constantes que determinan la distan-

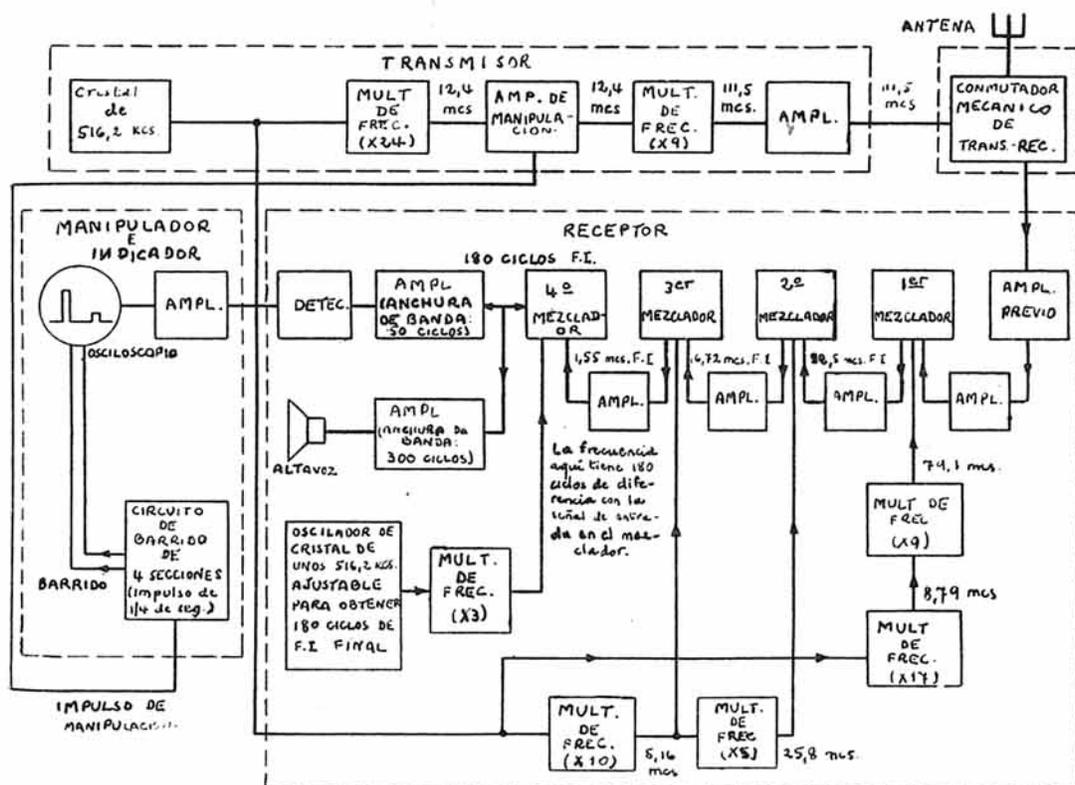


FIGURA 1.

Esquema de los elementos esenciales del sistema. El transmisor y el receptor están controlados por el mismo cristal, lo que permite una sintonía estable del receptor de banda estrecha en relación con la frecuencia del transmisor.

“radar” con la Luna son numerosas. Durante la guerra los alemanes utilizaron el cohete V-2, que se elevaba a unos 110 kilómetros de altura sobre la Tierra, y, desgraciadamente, el futuro promete la aparición de proyectiles capaces de remontarse aún más. La transmisión de señales

cia máxima a que un equipo “radar” puede detectar un objetivo, figuran la potencia máxima del transmisor, la radiofrecuencia de la señal transmitida, la duración de dicha señal, el coeficiente de ruido del receptor y la superficie de reflexión del eco del objetivo. Estas constantes

se resumen en lo que se ha denominado ecuación de "radar" del espacio libre, que es:

$$r = \sqrt[4]{\frac{P_t A_o G_o \sigma}{P_r (4\pi)^2}} \quad (1)$$

En ella, r es el alcance a que puede detectarse una señal; P_t , la potencia del transmisor durante el impulso; G_o , la ganancia de potencia de la antena transmisora; A_o , la superficie de absorción de la antena receptora; σ , el área útil de reflexión de eco del objetivo, y P_r , la potencia de una señal apenas discernible, sobre la misma base que P_t . La ganancia de potencia debida a las reflexiones de tierra (que no se incluye en esta ecuación) con la eficacia máxima, aumenta

adicional de ser de mando por cristal, consiguiéndose la radiofrecuencia final, después de una serie de multiplicaciones de frecuencia, por mediación de un oscilador de cristal de 516,2 kcs. El receptor de este transmisor era del tipo de mezcla múltiple (superheterodino cuádruple), capaz de reducir las señales de radiofrecuencia a una frecuencia intermedia final de 180 ciclos por segundo. Tal montaje permite que se use un paso de banda muy estrecho (57 ciclos por segundo), por lo que el receptor es muy selectivo y limita el ruido a un nivel muy bajo. El receptor de banda estrechísima tiene también la ventaja de que permite sintonizar en la radiofrecuencia exacta del eco de retorno. La importancia de este hecho puede comprenderse mejor

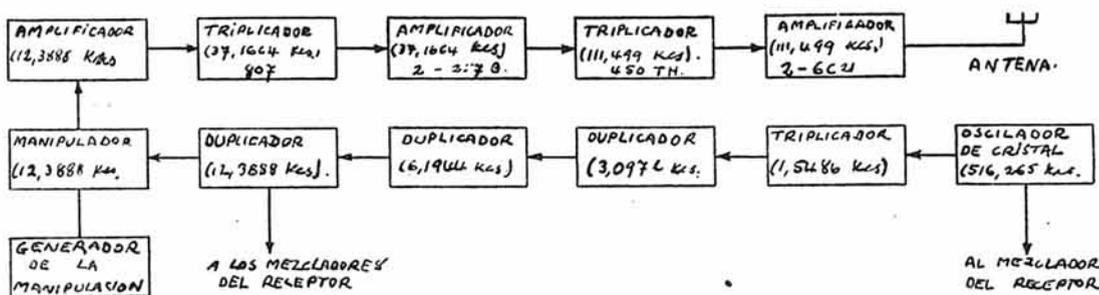


FIGURA 2.

Esquema de los pasos del transmisor propiamente dicho.

el alcance del sistema en un factor, que equivale a una ganancia de potencia de 12 decibelios.

Cuando se trata de un objetivo tan grande como la Luna (3,456 kms. de diámetro), los cálculos han demostrado que se requiere una anchura de impulso superior a 0,02 segundos para recibir en seguida un eco de todo el hemisferio lunar. Esto establece un límite mínimo para la anchura de impulso del transmisor, que corresponde a una anchura óptima de banda de 50 ciclos por segundo para el receptor. Este requisito elimina, al menos por ahora, el uso de las microfrecuencias, por consideraciones de longitud de impulso.

Los estudios de propagación demostraron que las ondas electromagnéticas, con una frecuencia de 110 mcs., eran capaces de atravesar la ionosfera, y como se disponía del equipo necesario, se eligió un equipo de "radar" que funcionaba con frecuencia de 111,5 mcs. La potencia máxima disponible en este transmisor equivalía a 3.000 vatios para P_t , utilizando un impulso de 0,25 de segundo. El transmisor tenía la ventaja

si se tiene en cuenta que, debido a las velocidades relativas de la Tierra y de la Luna, la señal de retorno puede diferir de la señal transmitida hasta en 300 ciclos, debido al cambio de frecuencia de Doppler. Al utilizar un receptor muy selectivo, cuyo mezclador final se sintoniza para recibir la frecuencia previamente calculada del eco devuelto por la Luna, el aparato rechaza cualquier señal devuelta en otra frecuencia.

Para reducir la contribución de ruido del receptor, entre la antena y el aparato propiamente dicho se intercaló un preamplificador de gran ganancia y poco cociente de ruido. La potencia recibida mínima perceptible fué P_r , que se calculó:

$$\overline{Nf} = \frac{E^2/4R}{KTB} \quad (2)$$

En esta fórmula $E^2/4R$ es la potencia máxima de señal en los terminales de entrada del receptor, medida en vatios; E^2 es la tensión de señal en los terminales de antena, y R , la impe-

dancia eficaz, en ohmios. KTB es la potencia máxima de ruido en la entrada del receptor, siendo K la constante de Boltzman ($1,37 \times 10^{-23}$ julios por grado Kelvin), T la temperatura en grados Kelvin (elegida a 300 grados), y B , la anchura de banda del ruido del receptor, en ciclos por segundo. Para este receptor, B es de 57. Para una relación de uno a uno, la ecuación (3) da una relación entre potencia de señal y de ruido de

$$P_r = \frac{E^2}{4R} = \overline{NF} KTB; \quad (3)$$

$1,48 \times 10^{-18}$ vatios, considerando que el receptor tiene un coeficiente eficaz de ruido de siete decibelios.

La mejor antena aplicable a esta frecuencia era un sistema de 32 dipolos, utilizado por el "radar" de aviso previo SCR-271. Se instalaron dos de estos sistemas adyacentes en una torre de 30 metros. Los cálculos demuestran que este montaje tiene una ganancia de potencia de 152 veces la de una sola antena dipolo de un semiperíodo. Como la ganancia efectiva de una sola dipolo es 1,64 veces la de un elemento radiante isotrópico, el valor de G_o se obtiene multiplicando 1,64 por 152, o sea 250.

La superficie de absorción A_o de la antena receptora se calcula mediante la fórmula

$$A_o = \frac{G_o \lambda^2}{4\pi} \quad (4)$$

Sustituyendo el valor de G_o , previamente obtenido, $A_o = 1.305,25 \times 10^{-7}$ kms. cuadrados.

La constante restante, que hay que hallar antes de resolver la ecuación (1), es σ , superficie eficaz de reflexión de eco del objetivo. Los cálculos del coeficiente de reflexividad realizados por Walter Mac Afee, del Grupo de Estudios Teóricos (suponiendo una conductividad nula y una constante dieléctrica de 6 para la Luna), dieron por resultado la cifra de 0,1766. La superficie eficaz de reflexión del eco se halla multiplicando esta cifra por la superficie proyectada de nuestro satélite, $d^2/4$, en donde d es el diámetro de la Luna. Esto da una superficie eficaz de reflexión del eco de: $0,1766 (3.456)^2 (3,1416)/4$; es decir, 1.617.500 kms. cuadrados.

Sustituyendo estos valores en la ecuación de "radar" del espacio libre, se obtiene un alcance máximo de 917.600 kms., lo que indica que el alcance eficaz del equipo elegido fué más del doble que el necesario para recibir ecos de la Luna. Sumando la ganancia de potencia debida a la reflexión de tierra, se logró un ulterior exceso de potencia de 12 decibelios, o un alcance de 1.824.000 kilómetros, lo que significaba que, según los cálculos, la señal recibida debía ser de unos 20 decibelios sobre el ruido térmico. Este cálculo de la potencia de señal del eco devuelto coincidió perfectamente con las observaciones efectuadas después e indicó que no hay atenuación apreciable en el espacio libre.

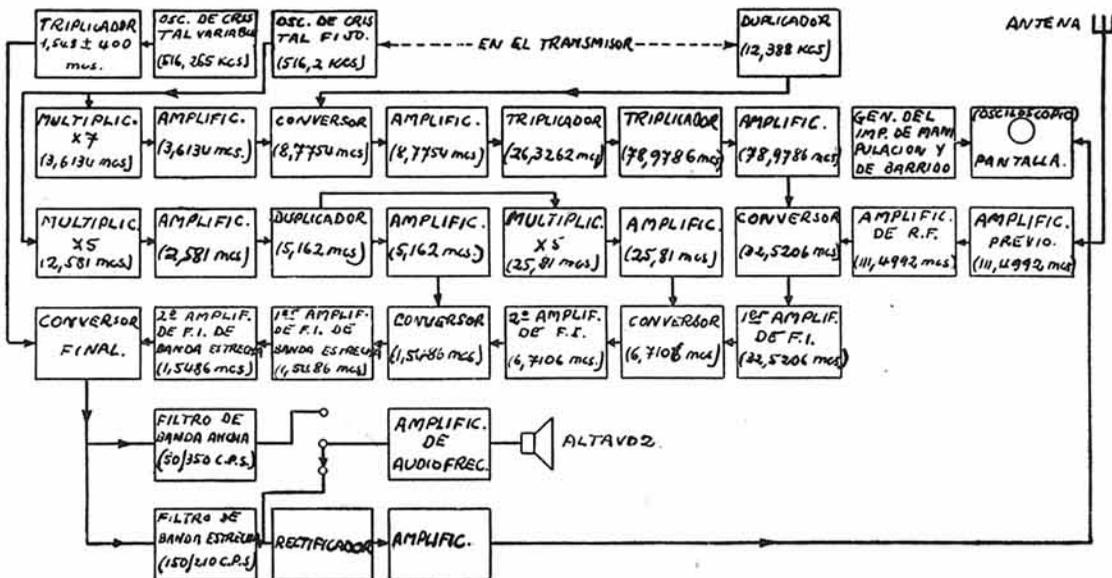


FIGURA 3.

Esquema del receptor, que es un superheterodino cuádruple.

Transmisor.—Una vez que se calcularon las constantes, se procedió a elegir entre los equipos de "radar" disponibles. Como no se iban a proyectar elementos componentes especiales para este experimento, la elección del receptor y transmisor se efectuó entre los equipos que había a mano. Por fin se decidió emplear un transmisor y receptor de "radar", con mando por cristal, proyectado por el Comandante E. H. Armstrong para otra cosa, pues satisfacía los requisitos de potencia y anchura de banda. La figura 1 representa un esquema de los pasos del sistema transmisor, receptor e indicador.

El transmisor tiene mando por cristal, obteniendo la radiofrecuencia final de 111,5 mcs. después de una serie de multiplicaciones de frecuencia, a partir de una frecuencia fundamental de 516,2 kcs. del oscilador de cristal. La "manipulación" se efectúa haciendo que un paso multiplicador de bajo nivel dirija, mientras dura la transmisión del impulso, mediante el mando de su negativo catódico. En el montaje inicial, la manipulación era mecánica por medio de un relevador; pero después se sustituyó por un manipulador electrónico, cuya anchura de impulso era regulable entre los 0,02 y los 0,2 segundos. La figura 2 es un esquema de los pasos del transmisor.

Por este esquema se puede ver que el transmisor es del tipo corriente. La salida se envía por una línea de transmisión, de hilo desnudo y de 250 ohmios de resistencia, al sistema de antena. Este sistema se compone de 64 dipolos con polarización horizontal. La ganancia eficaz de potencia del sistema es de 250, o de 24 decibelios.

La antena (fig. 4) está montada en una torre de acero de 30 metros de altura, y sólo es ajustable en azimut. No se instaló ningún medio para inclinar la antena en elevación. Debido a esta restricción, los períodos de observación con el equipo hubieron de limitarse necesariamente a la salida y puesta de la Luna. Se ha reconocido que esta condición es la peor, debido a la larga trayectoria a través de la atmósfera y a la consiguiente posibilidad de pérdida de radiaciones; pero no era práctico instalar un sistema de antena del tipo ecuatorial. Aparte de las deficiencias de propagación, la limitación más grave era el hecho de que las observaciones estaban limitadas a dos períodos muy cortos diarios.

La anchura del haz del sistema de antena es, aproximadamente, de 15 grados en los puntos de mitad de potencia, teniendo los tres primeros

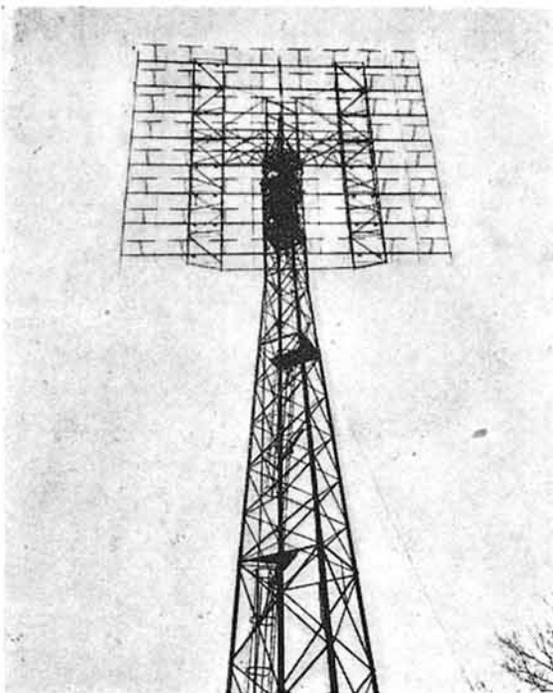


FIGURA 4.

La antena se compone de dos sistemas normales SCR-271, montados adyacentes, teniendo 64 dipolos en total.

lóbulos una separación aproximada de tres grados en elevación. Como el diámetro de la Luna subtende, aproximadamente, medio grado de arco, la mayor parte de la potencia transmitida no "ilumina" el objetivo, lo que constituye una grave pérdida de potencia. El ritmo de elevación de la Luna a lo largo de su eclíptica es de un grado de arco cada cuatro minutos, lo que permite unos cuarenta minutos de observación mientras nuestro satélite corta los tres primeros lóbulos de la antena. Es indudable que existen efectos de desviación, debidos a la larga trayectoria recorrida por la transmisión en la ionosfera; pero aún no ha sido posible efectuar ninguna medición precisa de ellos.

Sistema receptor.—El sistema receptor es lo suficientemente distinto de los tipos corrientes para merecer los honores de una descripción más detallada. La figura 3 es un esquema de los pasos del aparato. Todo el receptor tiene control por frecuencia, y en él hay cuatro pasos mezcladores que heterodinan la señal de radiofrecuencia a una frecuencia final intermedia de 180 c. p. s. Como las tres primeras inyecciones de tensiones de frecuencia y la radiofrecuencia

final se obtienen de los múltiplos de un oscilador común de cristal, se consigue que el sistema tenga una gran estabilidad de frecuencia. Este alto grado de estabilidad es esencial para poder sintonizar el receptor, que es muy selectivo, en la frecuencia de la señal de eco. Esta sintonía se efectúa en el paso heterodínico final.

Para sintonizar es necesario tener en cuenta el cambio de frecuencia de la señal de retorno, que resulta de las variaciones en la velocidad relativa de la Luna con respecto a la Tierra. La frecuencia del eco de llegada puede diferenciarse de la frecuencia transmitida hasta en 300 ciclos por segundo, puesto que las velocidades relativas de la Tierra y la Luna varían desde + 1.440 k. p. h., a la salida del satélite, hasta - 1.440 k. p. h. a la puesta. A la frecuencia del transmisor, una velocidad relativa de 4,8 k. p. h. entre la antena y el objetivo, hace que se produzca un cambio de aproximadamente 1 c. p. s. en la señal recibida. Este cambio de frecuencia, debido a las velocidades relativas de la antena y del objetivo, existe en todos los ecos recibidos de objetivos móviles; pero no se acusa en los receptores corrientes, porque su anchura de banda es muy superior a la del cambio de frecuencia.

En el receptor del proyecto Diana se obtiene una anchura de banda de 57 c. p. s. en los pasos finales de F. I. Por tanto, es necesario calcular previamente el cambio de frecuencia de Doppler para la observación que se está haciendo y seleccionar el cristal adecuado para el mezclador heterodínico final. Para conseguir la gran precisión requerida en este mezclador hay un dispositivo para modificar la frecuencia del oscilador, controlado por cristal mediante un mando de tornillo, que varía el espacio de aire encima del cristal. El ajuste final del oscilador se efectúa batiendo la salida de éste con la señal de una fuente normal de frecuencia secundaria y observando la salida resultante en un osciloscopio de control.

La salida del mezclador heterodínico final se envía a dos canales, uno de audiofrecuencia y otro de videofrecuencia. El primero es, sencillamente, un paso amplificador de potencia, cuya salida está conectada a un altavoz. El canal de videofrecuencia lleva a un segundo detector, para recuperar la envolvente de la señal de F. I. de 180 c. p. s., que después se amplifica con un amplificador de videofrecuencia de gran ganancia y se conecta directamente a las placas desviadoras verticales de un tubo de rayos catódicos,

que mide 22,5 cms. La deflexión horizontal es un barrido horizontal de tipo A, de cuatro segundos de duración. La salida visible es el característico trazado de ruido de baja frecuencia, que representa una anchura de banda de 57 ciclos, con el centro en los 180 c. p. s. Cuando se recibe un eco de la Luna tiene lugar un apartamiento brusco ascendente de la línea de fe. Esto se aprecia claramente en la figura 5. La señal audible son ruidos captados al azar, con una anchura de banda de 57 ciclos, superpuestos sobre una nota de frecuencia fija, a la F. I. de 180 ciclos, cuando se recibe el eco.

Como ya hemos indicado anteriormente, la sintonía del receptor se efectúa en el mezclador final. Hay que calcular para cada observación la frecuencia de la señal inyectada para tener en cuenta la velocidad relativa del objetivo y la antena, debido a la velocidad de rotación de la Tierra y a la velocidad de traslación de la Luna a lo largo de su eclíptica. Estos datos, en unión del ángulo azimutal y de la hora, se calculaban diariamente mediante la información facilitada por el *Almanaque y Efemérides Náuticas*. El receptor detecta con una gran precisión la frecuencia debida al cambio de Doppler. Este hecho corrobora por sí mismo que la señal de eco procede de la Luna. Tampoco es posible encontrar otra explicación para el intervalo de 2,4 segundos en el eco.

El amplificador previo del receptor se compone de un amplificador sintonizado de R. F., con tres pasos, dos de cuyos pasos tienen las rejillas puestas a tierra (6J4) y van seguidos por una amplificadora 6SH7, sintonizada en la frecuencia del transmisor. La ganancia total del amplificador previo solo, es de 30 decibelios, con un coeficiente total de ruido de 3,5 decibelios y una anchura de banda de 1 mc. El diseño eléctrico de los dos primeros pasos fué sugerido por un circuito ideado por el doctor F. B. Llewellyn. La figura 6 representa un esquema simplificado de los dos primeros pasos. El uso de inductancias de tubos concéntricos para los circuitos sintonizados proporciona un filtraje automático de R. F. en los conductores de c. c. y filamento. El amplificador previo fué proyectado originalmente como un perfeccionamiento para el "radar" SCR-271, e igual que el transmisor y el receptor, fué elegido para el experimento Diana porque satisfacía una de las condiciones, que era que el receptor tuviese un coeficiente muy pequeño de ruido. Entre el receptor y la línea de transmisión se utilizó un transforma-

dor sintonizado para equilibrar la impedancia, con objeto de convertir la entrada equilibrada de 250 ohms en la entrada sin equilibrar de 50 ohms del amplificador previo.

El sistema de conmutación de transmisión a recepción (caja de transmisión/recepción) empleado en el experimento original fué un juego de dos barras de cortocircuito, accionadas mecánicamente y situadas en la línea de transmisión, que eran actuadas desde un relevador, controlado por un multivibrador, durante el intervalo de 0,25 segundos de la transmisión del impulso. Una de las barras de cortocircuito sirve para poner en corto la entrada del receptor durante la transmisión, y la otra pone en corto el transmisor durante la recepción.

Manipulador e indicador.—El indicador óptico utilizado era un tubo electrostático de rayos catódicos, de 22,5 cms., tipo 9EP7, y con pantalla de gran persistencia. El haz electrónico explora la anchura total del tubo en sincronía con el impulso transmitido, durante cuatro segundos, formando una base lineal de tiempos. La persistencia es suficiente para conservar el trazado de, por lo menos, dos barridos. El circuito empleado para generar el barrido es un oscilador transitrón, de dientes de sierra, con acoplamiento directo, que se describe más adelante. Este circuito también genera un impulso cuyo

tiempo equivale al impulso de manipulación; dicho impulso se envía al cátodo de un paso multiplicador de bajo nivel, situado en el transmisor, haciendo que mande mientras dure el impulso a los multiplicadores siguientes.

El generador de la base de tiempos se compone, en esencia, de un amplificador pentódico de gran ganancia, con acoplamiento por condensador entre la placa y la rejilla. La figura 7 representa su esquema. El circuito acoplado por condensador incluye un paso con acoplamiento catódico, que es la sección de la izquierda de V_2 . Mientras dura el ciclo de conducción, la tensión anódica de la pñtoda V_1 disminuye, y el condensador C_1 empieza a descargarse a través de la válvula. A medida que la tensión de la placa baja, el paso de corriente por C_1 hace negativa la rejilla, tendiendo a interrumpir la corriente de placa. Entonces existe una condición de equilibrio dinámico, y la tensión de placa cae con un ritmo lineal, determinado por R_1 y C_1 , mientras la rejilla se mantiene a una tensión constante, puesto que cada descenso en la tensión de placa origina la correspondiente disminución en la rejilla, que mantiene aproximadamente constante la señal de rejilla, y en consecuencia, la salida de la válvula. La constante de tiempo de R_1 y C_1 se elige de forma que C_1 se descargue totalmente durante el ciclo.

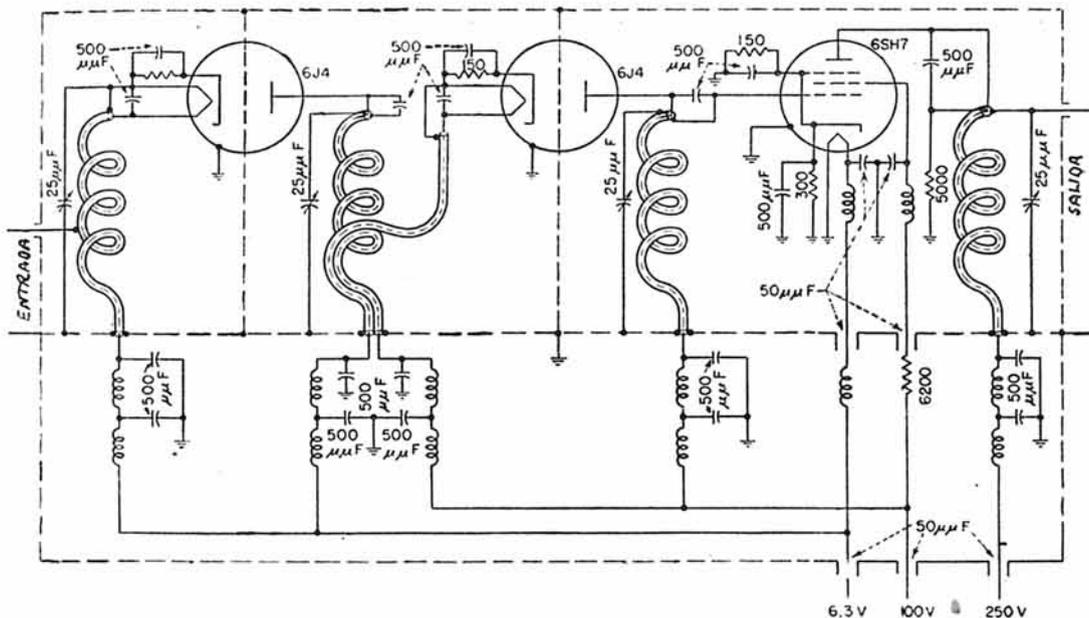


FIGURA 5.

Esquema del preamplificador de bajo nivel de ruido. Conductores coaxiales encerrados dentro de las bobinas eliminaban la R. F. de los circuitos de c. c.

