

RESUMEN

Este trabajo muestra una técnica de simulación en un computador de comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial para determinar la calidad de cada sistema de comunicaciones e implementar el sistema óptimo, como, la calidad de un sistema de comunicación; está determinado por su inmunidad contra el ruido y si el Electrochorro Ecuatorial parte del sistema pero tal que no puede ser afectado o mejorado se trabaja sobre la otra parte del sistema ensayando tipos de transmisiones y técnicas no convencionales de recepción con el fin de obtener un conjunto que afecte al mínimo las señales.

INTRODUCCION

Durante el año Geofísico Internacional Bowles y Cohen(1) establecieron las primeras comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial, usando frecuencias de HF y mecanismos de propagación de dispersión ionosférica.

Contaron con un transmisor de onda continua (CW) que operaba generalmente a una potencia de 2KW, con el cual obtuvieron señales 30 db mayor que otras realizadas con el mismo equipo en latitudes templadas, fue aquí que se sugirió que el Electrochorro Ecuatorial localizado a alturas entre 95 a 110 KM. podía ser usado como medio de comunicaciones durante el día en ciudades situadas en una banda de 10° centrándose en el Ecuador Magnético.

En 1966 Romero, Giesecke y Perez(2) repitieron el experimento entre las ciudades Lima-Juliana transmitiendo una onda continua (CW) a una potencia de 400 watts con el interés de determinar la intensidad de la señal receptionada y la razón de desvanecimiento de la transmisión.

Concluyeron que la intensidad es máxima para horas del día de 08 a 17 y es mínima a las 07:00 y 19:30 horas, otro máximo aunque menor que el diurno se presenta entre las 21 a 01 horas. Así mismo se determinó que la razón de desvanecimiento es mínima para horas del día y del orden de 20dB y máxima para las horas de mínima intensidad de señal alcanzan 100 dB. Por último indicaron que las variaciones estacionales no afectan a la intensidad de la señal diurna.

Posteriormente Romero estableció la primera comunicación de voz vía Electrochorro Ecuatorial utilizando un equipo comercial de RLU y obteniendo una transmisión de baja calidad causada por 2 factores: una variación en la fase de la señal originada por el medio y un "Gorgojeo" superpuesto debido a la razón de desvanecimiento del Electrochorro.

En Setiembre de 1971 Heraud(3) estableció transmisiones de señales de voz empleando modulación de frecuencia de banda angosta y obteniendo una mejor inteligibilidad que aquella obtenida por Romero en HF, pero sujeta a ruido impulsivo que originada un salto a una frecuencia aproximada de 20MHz, se obtuvo buena inteligibilidad para relaciones señal/ruido de 30 db y una muy pobre para relaciones de 15 a 10 db.

Estos 2 últimos experimentos tratan de buscar el sistema de modulación apropiado para obtener una comunicación de buena calidad. Heraud demostró que el sistema más eficaz es el de modulación de frecuencia, cabe aún experimentar transmisiones con sistemas no convencionales de modulación y de recepción por diversidad, con los cuales la calidad debe ser superior. Pero debido al costo del experimento, al tiempo, mano de obra, resalta la conveniencia de "probar" los sistemas de comunicaciones en un computador digital, para lo cual se formularán modelos matemáticos del efecto del Electrochorro Ecuatorial en las comunicaciones y algoritmos que simulen el sistema de comunicación en sí.

Ahora bien, el proceso de simulación consta de varias partes elementales, enumeradas a continuación, algunas de las cuales se han implementado mediante unidades periféricas que paulatinamente se han ido anexando a la computadora del Radio Observatorio de Jicamarca.

- una señal de voz es digitalizada mediante un conversor Analógico-Digital ADC de 8 bits y luego esta señal de voz transformada, es recohrada mediante un conversor Digital-Analógico DAC.
- El sistema de comunicación que se simula es de modulación de fase de banda angosta.
- El Electrochorro Ecuatorial es considerado como un medio dispersivo de comunicación que origina desvanecimientos a una repetición entre 20 y 100Hz.
- La simulación contará con partes hechas en la computadora, digitalmente y otras a nivel de circuitos analógicamente, de forma que en conjunto se tenga simulando en forma completa el sistema.
- Se simulará transmisiones para diferentes relaciones de señal/ruido, todas las cuales, serán grabadas en un cassett.

Asimismo se incluye en el desarrollo del presente trabajo algunos puntos teóricos acerca del sistema de modulación utilizado, y algunas referencias estadísticas y espectrales de una señal de voz.

1. COMUNICACIONES POR DISPERSION VIA ELECTROCHORRO

Las comunicaciones por dispersión que se realizan por el Electrochorro Ecuatorial, al igual que aquellas que se efectúan mediante este método de propagación en la capa D, son ocasionadas por la existencia de irregularidades ionosféricas, las cuales originan un cambio en el valor del índice refractivo. Estas irregularidades que en definitiva son las que determinan la transmisión de dispersión pueden ser: una variación en la densidad electrónica, o la acción de una turbulencia.

Estas variaciones no obedecen una ley definida sino que son aleatorias, por lo tanto para definir un medio dispersivo tendremos que contar con su estadística.

En el caso general, de un medio dispersivo, se puede afirmar que el proceso de dispersión actúa como un filtro de banda angosta por lo tanto se puede indicar que su función de transferencia será de la forma:

$$F(\omega, T)$$

O sea dependiente de la frecuencia y del tiempo. Esta dependencia del tiempo T es la que origina la dispersión en frecuencia para una señal de entrada.

La respuesta para un impulso de entrada de un medio dispersivo se puede modelar como:

$$f(t) = f_1(t) \cos \omega_c t + f_2(t) \sin \omega_c t$$

Ahora bien en el caso del Electrochorro Ecuatorial es una cierta forma más amplia su función de transferencia pues es independiente de la frecuencia pero surge una complicación al tener que tomar en cuenta sus variaciones aleatorias (su estadística).

Se puede modelar como función de transferencia la siguiente expresión:

$$H(t, T)$$

O sea es independiente de 2 expresiones del tiempo, pero aportando la variable t una variación más lenta que la variable T . La respuesta a una función impulso será de la forma:

$$A(t) \cos \omega_c T \delta(T) + B(t) \sin \omega_c T \delta(T)$$

Donde $A(t)$ y $B(t)$ son variables aleatorias las cuales van a ser definidas de acuerdo a la dinámica del proceso y son los coeficientes de las componentes en fase y en cuadratura de la frecuencia central ω_c .

Para determinar las funciones de densidad probabilísticas de $A(t)$ y $B(t)$, se ha recurrido a observaciones de amplitudes de señales recibidas de este medio dispersivo; demostrando que la envolvente de la amplitud sea:

$$z(t) = \sqrt{A(t)^2 + B(t)^2}$$

tiene una función de densidad Rayleigh

$$f_z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp^{-z^2/2\sigma^2} U(z)$$

Como $A(t)$ y $B(t)$ son estadísticamente idénticos pero independientes.

$$\langle A(t) A(t+\tau) \rangle = \langle B(t) B(t+\tau) \rangle = \rho(\tau)$$

$$\text{y } \langle A(t) B(t+\tau) \rangle = \langle AB(\tau) \rangle = 0$$

Se debe concluir que son procesos Gaussianos con funciones de densidades

$$f_A(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp^{-A^2/2\sigma^2}$$

También se puede establecer la función de densidad para la fase $\phi(t)$, que añadirá el medio dispersivo de modulación de fase esto será muy importante en la recepción de nuestra señal. Pero en todo caso se originará solamente un corrimiento de fase.

$$\phi(t) = \text{Arctan} \frac{B(t)}{A(t)} \text{ si } |\phi(t)| < \frac{\pi}{2}$$

Luego:

$$f_{\phi(t)}(\phi(t)) = \frac{1}{\pi} \quad |\phi(t)| < \frac{\pi}{2}$$

Según la función de densidad para $\phi(t)$ ésta es uniformemente distribuida en el intervalo $(-\pi/2, \pi/2)$

Además es importante anotar el ancho de banda de las amplitudes $A(t)$ y $B(t)$, el cual está ligado a la razón de desvanecimientos que tienen las conversaciones vía Electrochorro Ecuatorial. Anteriormente se mencionó que las pruebas realizadas con transmisores de onda continua se estableció que esta razón de desvanecimientos variaba entre 20 y 100 Hz en el transcurso de un día, luego estas frecuencias son las que limitarán el ancho de banda de las señales $A(t)$ y $B(t)$.

Con las características anteriormente enumeradas, función de densidad, correlación, ancho de banda, etc... se tiene modelado completamente al Electrochorro Ecuatorial como medio dispersivo, y que sufre variaciones aleatorias en el tiempo, luego en el proceso de simulación se deberán crear las señales $A(t)$ y $B(t)$ que cumplan con estas características.

2. ANALISIS ESPECTRAL DE UN MENSAJE HABLADO

Debido a que la simulación se hace en base a la transformación de un mensaje hablado procesado en un computador, y cuyo nuevo valor es el resultado que se llega luego de la transmisión a través del electrochorro Ecuatorial, es que se ha creído conveniente hacer mención de las características espectrales de un corto mensaje hablado.

Para efectuar el análisis espectral se ha tomado como base a la frase "RADIO OBSERVATORIO DE JICAMARCA". Para la selección de esta frase se ha tomado en cuenta que contiene una amplia gama de frecuencias.

En la realización del análisis espectral, primero se digitalizó la frase, y luego se grabó en cinta magnética digital. Posteriormente con programas que evalúan la transformada de Fourier, se grabó en otra cinta los espectros con ventanas en el tiempo de 256 puntos, tomados cada 40 puntos. Como el tiempo de digitalización es de 133 μseg , una ventana de 256 puntos equivale a 33 mseg , o sea una frecuencia de 30 Hz, la cual es menor que la máxima frecuencia contenida en señales de voz. Por lo tanto tendremos en estos espectros todo el ancho de banda de la señal de voz, así como una excelente resolución debido al espaciamiento elegido de 40 puntos, o 5.3 mseg .

En el gráfico #1 se tiene el espectrograma del mensaje en estudio, cuyo significado lo podemos entender mejor con la ayuda de una clasificación espectral de los diferentes tipos de sonidos vocales.

- Sonidos casi-periódicos obtenidos por movimientos vibrantes. Su espectro será con una frecuencia fundamental y varias resonantes.
- Sonidos casi-aleatorios; su espectro tendrá características resonantes.
- Vacíos o períodos de silencio de voz en espectros nulos, o de valores completamente aleatorios.
- Impulsos, sonidos explosivos subsecuentes a vacíos de voz. Tienen un espectro que abarca gran cantidad de armónicas.

En el gráfico #1 podemos deducir que cada una de las partes se refiere a cada una de las palabras del mensaje. Incluso se puede notar que en la palabra 'radio' la primera sílaba 'ra' tiene el mayor contenido de potencia en las armónicas 18, 23, 32 y 37, lo cual equivale a un ancho de banda que va de 540 Hz a 1110 Hz.

La utilidad mayor está en que al simular una comunicación por el electrochorro, la señal va a transformarse, y es en el espectro de frecuencias que conocer más fácilmente los tipos de cambios experimentados, y hasta detectar visualmente la señal del ruido.

En este trabajo se ha simulado la transmisión de la frase "RADIO OBSERVATORIO DE JICAMARCA" vía Electrochorro Ecuatorial. Se han obtenido los espectros de la señal antes de la transmisión y después de la recepción obteniéndose importantes resultados.

HZ

GRAFICO N° 1

3300—

2700—

2100—

1500—

900—

300—

0—

0.5

1.0

1.5

Seg.

R A D I O

OBSERVATO

R I O D E

J I C A M A R C A

El presente informe es el resultado de la observación realizada en la estación de radio observación de la JICA, en la ciudad de Lima, el día 10 de mayo de 1964. Los datos obtenidos se refieren a la actividad de las ondas de radio en la frecuencia de 3.5 MHz, en la banda de ondas de radio de alta frecuencia. Los resultados de la observación se expresan en la siguiente forma: Se observó una actividad normal de las ondas de radio en la frecuencia de 3.5 MHz, en la banda de ondas de radio de alta frecuencia. Los resultados de la observación se expresan en la siguiente forma: Se observó una actividad normal de las ondas de radio en la frecuencia de 3.5 MHz, en la banda de ondas de radio de alta frecuencia.

3. SIMULACION DE COMUNICACIONES VIA ELECTROCHORRO ECUATORIAL

El sistema de comunicaciones que vamos a simular es uno con modulación de fase de banda angosta, por lo tanto es conveniente expresar matemáticamente una señal que ha sido modulada con una moduladora cualquiera $\phi(t)$, en nuestro caso la señal de voz:

$$F(\omega, \tau) = \sin \phi(t) \cos \omega_c t + \cos \phi(t) \sin \omega_c t$$

Donde para modulación de banda angosta se debe cumplir:

$$\phi(t) < 0.5 \text{ radianes}$$

Esta señal modulada es la entrada a nuestro modelo del medio, que tiene una respuesta de impulso $h(t, \tau)$; por lo tanto la salida será el producto de los dos en el dominio de la frecuencia, o la convolución de los mismos en el dominio del tiempo:

$$O(t) = h(t, \tau) * f(\omega, \tau)$$

o sea

$$O(t) = \int_0^t f(t-\tau) h(\tau) d\tau$$

haciendo

$$\begin{aligned} O(t) &= \int_{-\infty}^t [V_1(t-\tau) \sin \omega_c(t-\tau) + V_2(t-\tau) \cos \omega_c(t-\tau)] [A(\tau) \cos \omega_c \tau + B(\tau) \sin \omega_c \tau] \delta(\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^t V_1(t-\tau) A(\tau) \sin \omega_c(t-\tau) \cos \omega_c \tau \delta(\tau) d\tau + \\ &\quad + \int_{-\infty}^t V_1(t-\tau) B(\tau) \sin \omega_c(t-\tau) \sin \omega_c \tau \delta(\tau) d\tau + \\ &\quad + \int_{-\infty}^t V_2(t-\tau) A(\tau) \cos \omega_c(t-\tau) \cos \omega_c \tau \delta(\tau) d\tau + \\ &\quad + \int_{-\infty}^t V_2(t-\tau) B(\tau) \cos \omega_c(t-\tau) \sin \omega_c \tau \delta(\tau) d\tau \end{aligned}$$

despreciando los términos de dobles frecuencias:

$$\begin{aligned} O(t) &= [A(t) \cos \phi(t) + B(t) \sin \phi(t)] \sin \omega_c t + \\ &\quad + [-B(t) \cos \phi(t) + A(t) \sin \phi(t)] \cos \omega_c t \end{aligned}$$

También en el receptor se debe el ruido blanco aditivo, por lo cual la expresión tomará la forma de

$$\begin{aligned} O_1(t) &= [A(t) \cos \phi(t) + B(t) \sin \phi(t) + N_1(t)] \sin \omega_c t \\ &\quad + [-B(t) \cos \phi(t) + A(t) \sin \phi(t) + N_2(t)] \cos \omega_c t \\ &= C(t) \sin \omega_c t + S(t) \cos \omega_c t \end{aligned}$$

El detector de fase en el receptor efectuará la operación siguiente:

$$P(t) = \arctan \frac{S(t)}{C(t)}$$

La señal $P(t)$ será la nueva señal de voz simulada que proviene de una transmisión vía electrochorro ecuatorial.

Los pasos que conducen a la simulación completa de una comunicación vía Electrochorro ecuatorial desde que un locutor habla por un micrófono, hasta que puede escucharse su voz transformada son:

1) La señal eléctrica de ± 0.1 volt proveniente del micrófono es amplificada 100 veces, y mediante un filtro pasabajos de 3400 Hz de frecuencia de corte, se elimina el ruido de mayor frecuencia. Se escogió este factor de amplificación para aprovechar todo el rango dinámico del circuito siguiente. Esta amplificación se llevó a cabo mediante un amplificador operacional, con el cual se consiguió una buena linealidad en este rango de frecuencias.

2) Luego la señal de audio análoga es digitalizada mediante un tren de púlsos muestreadores a 7500 Hz, siendo esta última frecuencia mayor que la frecuencia de Nyquist. La digitalización se llevó a cabo mediante el sistema de digitalización del Radio Observatorio de Jicamarca, con el cual se puede muestrear hasta 8 señales distintas simultáneamente. Este sistema está constituido de módulos muestreadores/retenedores (S/H), un multiplexer y un conversor de análogo a digital (ADC).

Existe un paquete de rutinas que controlan y conducen la entrada de datos digitalizados a la memoria de la computadora. Para los efectos de la simulación se escribió un programa en FORTRAN que almacenaba los datos en cinta magnética, empleándose un solo canal del sistema ADC.

3) El programa que efectúa la simulación propiamente dicha escrito también en lenguaje FORTRAN, lee los datos de la cinta magnética previamente grabada calculando para cada valor de $\phi(t)$ su correspondiente $C(t)$ y $S(t)$, que originan nuestra señal $P(t)$.

Los coeficientes $A(t)$ y $B(t)$ que deben ser aleatorios gausseanos y con un ancho de banda específico son generados mediante rutinas de números aleatorios y luego convolucionados con un filtro de respuesta gausseana que posee el ancho de banda deseado.

$N(t)$ y $N(t)$ son aleatorios gausseanos y como representan ruido blanco no es necesario filtrarlos.

La simulación debe ser hecha para varias relaciones de señal a ruido, por lo tanto se ha repetido el programa 7 veces para relaciones de 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 40 db. La relación señal a ruido es el cociente de la potencia de $A(t)$ entre la de $N_1(t)$. Por ser éstas variables aleatorias, su potencia está dada por su varianza. Luego escogiendo convenientemente éstas, se tiene la relación señal a ruido deseada.

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{ot}(A(t))}{P_{ot}(N_1(t))} = \frac{\sigma_{A(t)}^2 \times F_L^2(t)}{\sigma_{N_1(t)}^2}$$

Donde

$$\begin{aligned} \sigma_{A(t)}^2 & \text{ varianza de } A(t) \\ \sigma_{N_1(t)}^2 & \text{ varianza de } N(t) \\ F_L^2(t) & \text{ potencia del filtro gausseano.} \end{aligned}$$

4) Por último en el programa se debe efectuar la operación siguiente

$$O(t) = \arctan \frac{S(t)}{C(t)}$$

Pero para no considerar la rotación de fase que le introduce el modelo del electrochorro consideraremos:

$$\Delta O(t) = O_{t+1}(t) - O_t(t) = \frac{S_{t+1} C_t - S_t C_{t+1}}{S_t S_{t+1} + C_t C_{t+1}}$$

De la manera como se ha definido $O(t)$, es necesario posteriormente efectuar una integración, pero esto lo hacemos analógicamente para evitar que errores de redondeo acumulativos nos den valores excesivamente muy altos o muy bajos. Luego se graba en la cinta los valores de $\Delta O(t)$.

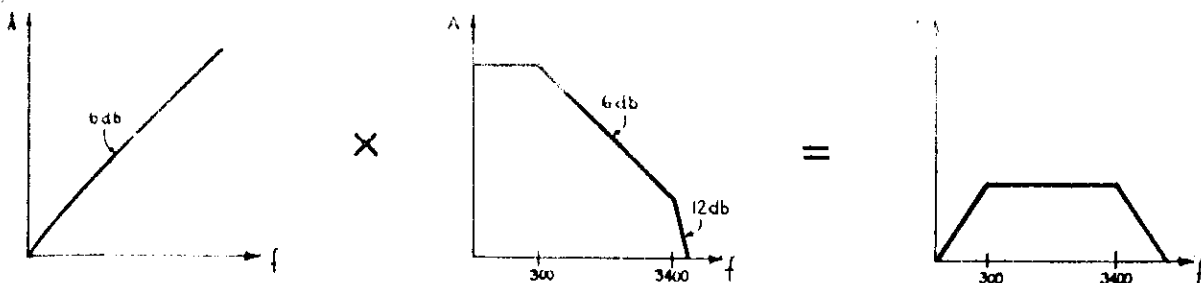
5) Por último un programa lee los datos transformados, o sea $\Delta O(t)$, y los conduce a un conversor de digital a análogo, DAC, donde puede ser procesado analógicamente. A la salida del DAC se tiene

$$O(t) = O'(t) = sO(t)$$

Con un integrador de la forma

$$\frac{1}{(s+\alpha)(s+\beta)}$$

tendremos:



En conjunto, estas transformaciones equivalen a un filtro pasabanda que no afecta las frecuencias correspondientes a la voz.

e) Esta señal entra a un circuito amplificador y sale a un parlante. El amplificador tiene ganancia 1 y está realimentado con el fin de obtener una buena linealidad en frecuencia.

CONCLUSIONES

Las transmisiones reales que se han efectuado en el electrochorro ecuatorial empleando modulación de frecuencia han mostrado cuál es el efecto del medio sobre este sistema de comunicaciones. En comunicaciones reales se notaba la presencia de desvanecimientos que se manifestaban en las conversaciones como continuos "cracks", o pequeños intervalos de tiempo en los cuales se pierde la comunicación.

En transmisiones simuladas que están registradas en el cassette, también se nota la presencia de estos "cracks", cuya amplitud y repetición son función de la razón señal/ruido y del ancho de banda elegido para $A(t)$ y $B(t)$. Por lo tanto el modelo escogido del Electrochorro Ecuatorial como medio de comunicación, lo representa adecuadamente, siendo aquí fácil de implementar diferentes relaciones de señal y ruido y diferentes grados de desvanecimiento, y de determinar de esta manera cuáles son las mejores condiciones de transmisión garantizando una inteligibilidad especificada en la comunicación.

Esta técnica puede extenderse para simular otros sistemas de comunicaciones y otros medios de transmisión con el fin de "obtener" resultados sin necesidad de construir el sistema, o poder determinar características óptimas para una implementación real.

Como forma de mostrar la existencia de desvanecimientos en la conversación simulada, se ha trazado un espectrograma de la simulación de una transmisión de 20 db. de S/N, la cuál es una conversación que se halla en el límite de la inteligibilidad. Se ve claramente que existen zonas o períodos de tiempo en los cuales se tiene un espectro que abarca todas las fre-

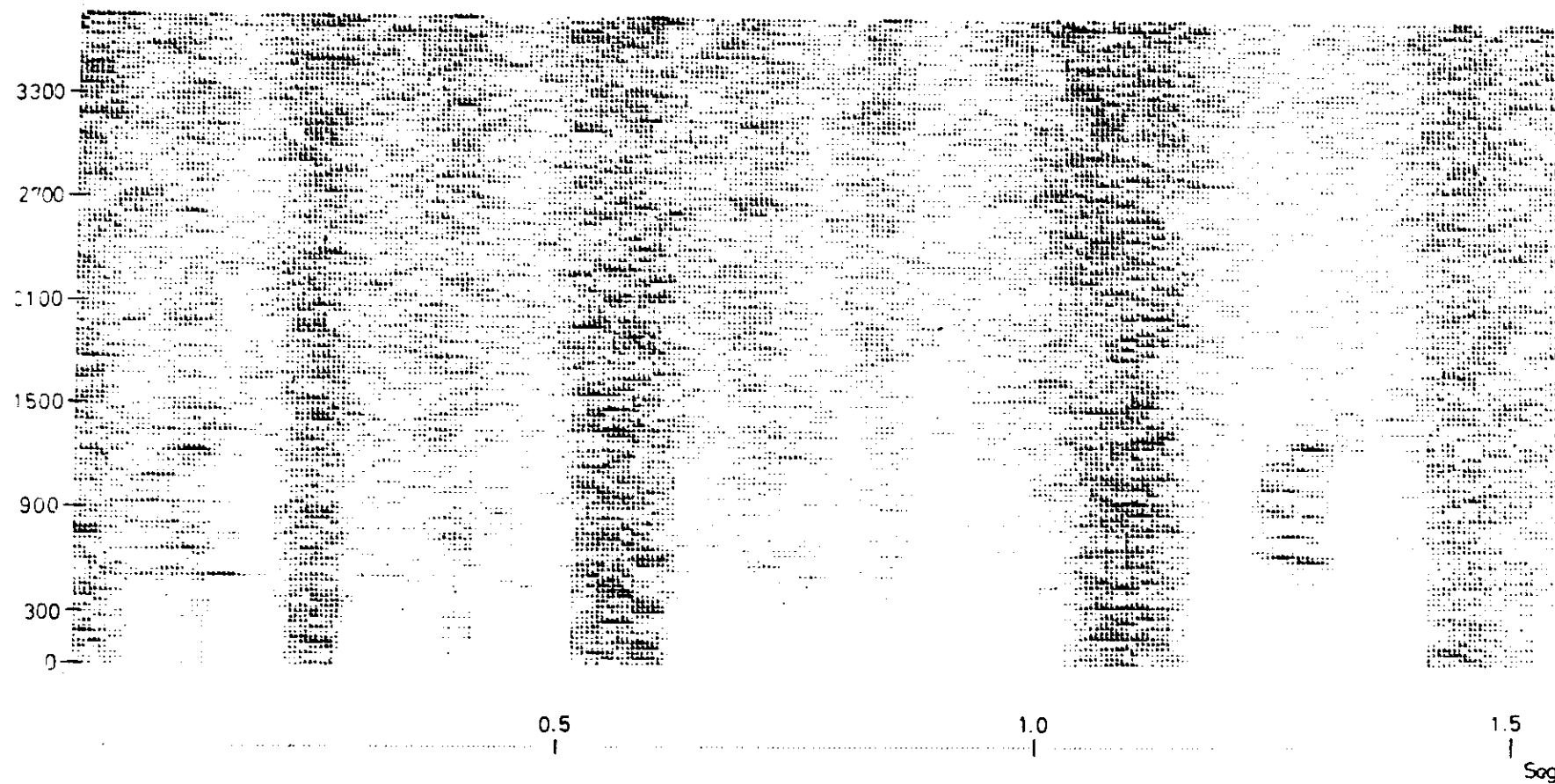
cuencias. Estas 9 franjas en el espectro corresponden a eventos en los que se producían desvanecimientos profundos, propios de comunicaciones a través de medios dispersivos como el Electrochorro Ecuatorial.

Lo que es importante indicar es que a pesar de que el espectro del mensaje hablado "Radio Observatorio de Jicamarca", está enmascarado por los desvanecimientos y por el ruido aditivo, es posible reconocer partes de los espectros en los cuales son iguales, como por ejemplo a comienzo la sílaba RA, y al final, más notorio aún, el espectro de las sílabas MARCA.

Dada la ayuda que ofrece la simulación de una comunicación, es posible ensayar técnicas más sofisticadas, como sería el caso de simular un sistema de recepción por diversidad de espacio, para lo cual se simularía la existencia de dos receptores que estarían conmutándose de acuerdo al nivel de señal existente en cada uno de ellos.

REFERENCIAS

- (1) Cohen R., K. Bowles, "Ionospheric VHF scattering near the magnetic Equator during the International Geophysical Year", J. of Research of the National Bureau of Standards, Sep. 1963.
- (2) Romero C. A., A. Giesecke, O. Pérez, "Propagación de ondas de radio en VHF por dispersión ionosférica en el Electrochorro Ecuatorial", Informe Preliminar, Instituto Geofísico del Perú con la Jefatura de Transmisiones del Ejército Peruano, 1968.
- (3) Heraud, J., "Estudios de propagación utilizando el fenómeno de dispersión en el Electrochorro Ecuatorial", Informe Preliminar N° 1, Instituto Geofísico del Perú, 1972.
- (4) Davies, K., "Ionospheric Radio propagation", National Bureau of Standards, April 1965.
- (5) Lucky R. W., J. Salz, E. J. Weldon Jr., "Principles of Data communication", Bell Telephone Laboratories Inc., 1968.
- (6) Papoulis A., "Probability Random Variables, and Stochastic Processes", McGraw Hill, 1965.



R A D I O

O B S E R V A T O

R I O D E

J I C A

M A R C A