

FASE EN LA ONDA DE SUPERFICIE

(Cuestión 1/5)

(1978-1982-1986-1990)

1. Introducción

1.1 Reviste importancia la fase de la onda de superficie por dos motivos principales: debido a la estabilidad de esa fase, pueden funcionar sistemas de radionavegación de precisión, como el Decca y el Loran-C; inversamente, la precisión con que miden la fase de la onda de superficie mediante tales sistemas de radionavegación permite la verificación experimental precisa de las teorías de propagación de la onda de superficie.

1.2 Conviene definir la fase de la onda de superficie, Φ , como la suma de una fase primaria y de una fase secundaria, Φ_s . A una distancia, d , del transmisor, la fase de la onda de superficie viene dada por:

$$\Phi = nkd + \Phi_s$$

siendo n el índice de refracción de la atmósfera en la proximidad de la superficie de la Tierra y $k = 2\pi/\lambda$; λ es la longitud de onda de la señal de onda de superficie cuando se propaga en el espacio libre. En esta ecuación, Φ_s se expresa en radianes (rad); sin embargo en la mayoría de aplicaciones se expresa como un retardo de fase en microsegundos, existiendo la siguiente relación entre ambas:

$$t_s = \frac{\Phi_s \cdot \lambda}{2\pi \cdot 300} = \frac{\Phi_s \cdot 10^6}{2\pi f}$$

donde:

- t_s : retardo de la fase secundaria (μ s),
- Φ_s : fase secundaria (rad),
- λ : longitud de onda (m) y
- f : frecuencia (Hz).

El resto de este Informe trata de los diferentes factores que influyen en la fase secundaria y de los métodos para calcular esta fase secundaria.

2. Terreno liso y homogéneo

El punto de partida básico para el cálculo de la fase secundaria, es la teoría de la propagación de la onda de superficie por un terreno liso y homogéneo [Johler y otros, 1956]. Los métodos habitualmente utilizados son idénticos al empleado para calcular las curvas de amplitud de la onda de superficie que figuran en la Recomendación 368. Este método básico puede aplicarse también a sistemas de radionavegación por impulsos [Johler y otros, 1979].

Con objeto de ampliar este método básico a casos más generales, conviene plantear los cálculos en función de una impedancia de superficie general [Hill y Wait, 1980]. Muchos de los métodos utilizados para calcular la fase de la onda de superficie aplican un concepto de impedancia efectiva de superficie que incluye una conductividad y permitividad efectivas.

* Este Informe debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 2.

3. Perturbaciones de la fase secundaria

En frecuencias inferiores a unos 3 MHz, puede aplicarse la teoría del terreno liso y homogéneo para calcular la fase de la onda de superficie, con el grado de exactitud que se precisa en los sistemas de navegación, en trayectos marítimos incluidos los de gran oleaje. En trayectos terrestres, sin embargo, la fase secundaria sufre modificaciones debidas a las variaciones de las características eléctricas a lo largo del trayecto, irregularidades del terreno y capas del subsuelo. Se han desarrollado varios métodos para predecir la perturbación de la fase secundaria por esos factores [Samaddar, 1979].

3.1 Capas del subsuelo

En el Informe 229, se describe el efecto de las capas del subsuelo sobre la propagación de la onda de superficie. El mismo método de impedancia efectiva que se usa [Wait, 1970] para calcular la amplitud de la onda de superficie puede utilizarse para calcular la fase de dicha onda, si se dispone de un modelo de las características eléctricas del subsuelo [Johler y Horowitz, 1974] apropiado para calcular la impedancia efectiva del suelo. Puede emplearse este mismo método en trayectos marítimos para predecir el efecto del hielo del mar sobre la fase [Bourne y otros, 1970].

3.2 Trayectos no homogéneos

Al variar las características eléctricas o la impedancia del suelo a lo largo de un trayecto (por ejemplo, en el límite tierra-mar), se produce una variación brusca correspondiente de la amplitud y de la fase de la onda de superficie. En este caso, puede calcularse la fase por el método de Millington-Pressey [Pressey y otros, 1953]. El método es totalmente análogo al de Millington para calcular la intensidad de la onda de superficie en trayectos no homogéneos. Puede calcularse la fase de una onda de superficie a lo largo de un trayecto de dos secciones a partir de la fórmula del método de Millington, que figura en el anexo II a la Recomendación 368, a condición de sustituir en las fórmulas las amplitudes por las fases correspondientes del suelo homogéneo.

En el norte de Noruega, mediciones de las señales Loran-C (100 kHz) sobre un trayecto de 600 km ha mostrado que los valores medidos y los valores calculados por el método de Millington-Pressey coinciden bastante. También es posible obtener buenos resultados utilizando el método simplificado de Millington (gráfico) [Saether y Vestmo, 1987].

Cuando las características eléctricas de la Tierra son distintas en diferentes direcciones, el frente de onda se inclina hacia el área de conductividad más baja. Esto puede causar problemas para los sistemas de radiogoniometría. Mediciones efectuadas en Dinamarca han mostrado que las señales procedentes de una baliza radioeléctrica (374 kHz) presentaban desviaciones de hasta 10° con respecto a la dirección acimutal correcta [Stokke, 1988].

3.3 Irregularidades del terreno

En el Informe AB/5 se describe una teoría de impedancia efectiva para calcular los factores de propagación de la onda de superficie sobre un terreno irregular. No obstante, la exactitud deseada para aplicaciones de radionavegación exige cálculos muy complejos. En tal caso, resulta más eficaz utilizar el método de la ecuación integral para calcular la fase de la onda de superficie.

3.4 Método de la ecuación integral

En el Informe AB/5 se describe el método de la ecuación integral. Puede utilizarse ese método para calcular la fase de la onda de superficie en terreno irregular y no homogéneo. En la fig. 1 se comparan los métodos de cálculo con las mediciones experimentales [Samaddar, 1979]. El trayecto representado, cruza el valle denominado «Death Valley» (California), a 100 m por debajo del nivel del mar, y la cadena montañosa de Sierra Nevada. El cálculo por el método de Millington-Pressey emplea un modelo de impedancia efectiva en suelo regular de dos capas.

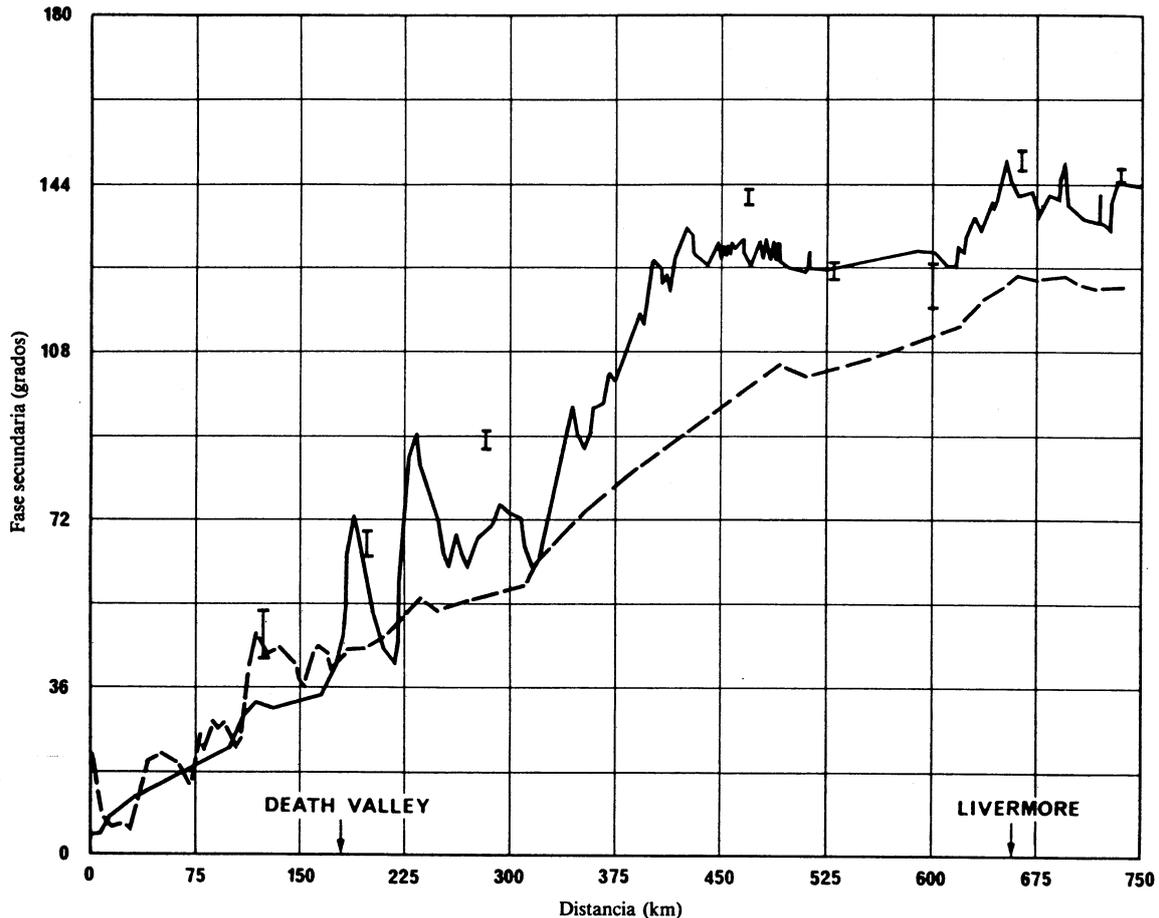


FIGURA 1 - Comparación entre la fase medida y la calculada para el sistema Loran-C de la costa occidental de Estados Unidos de América

(Los puntos medidos se indican por el símbolo (I). La línea de trazo lleno se ha obtenido por el método de la ecuación integral. La línea de trazos se ha calculado por el método de Millington-Pressey con impedancias efectivas del suelo para un modelo de dos capas. En 100 kHz, una fase secundaria de $1 \mu\text{s}$ (véase el punto 1.2 precedente) corresponde a 36°).

4. Efectos meteorológicos

Varios estudios de la estabilidad de las señales Loran-C han puesto de manifiesto variaciones de fase correspondientes a variaciones del tiempo de llegada de hasta $\pm 0,5 \mu\text{s}$ [Doherty y Johler, 1975; Samaddar, 1980]. Tales variaciones presentan una característica diurna y otra a largo plazo y están correlacionadas con variaciones del gradiente del término independiente de la humedad del índice de refracción. Las variaciones a más largo plazo están relacionadas con el paso de un frente meteorológico a lo largo del trayecto de medición.

Se ha observado que los cambios en la fase de la onda de superficie preceden al paso de un frente cálido. Se producen cambios similares después del paso de un frente frío. Se piensa que en el futuro será posible corregir, en promedio, los datos de navegación, para tener en cuenta los efectos meteorológicos, utilizando una estación meteorológica y los datos de estaciones de comprobación técnica del sistema.

En Noruega, mediciones efectuadas a 100 kHz en un trayecto de 600 km, en su mayoría sobre terreno de escasa conductividad, han arrojado variaciones climáticas estacionales en el retardo de la fase del orden de 200 - 400 ns [Saether y Vestmo, 1987].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOURNE, I. A., ROSS, D. B. y SEGAL, B. [1970] Phase instability in radio waves propagating across ice-covered seas. AGARD Conf. Proc. No. 33, NTIS Accession Number AD 882901, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Estados Unidos de América.
- DOHERTY, R. H. y JOHLER, J. R. [1975] Meteorological influences on LORAN-C ground-wave propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1117-1124.
- HILL, D. A. y WAIT, J. R. [1980] Ground-wave attenuation function for a spherical earth with arbitrary surface impedance. *Radio Sci.*, Vol. 15, 3.
- JOHLER, J. R., DOHERTY, R. H. y COOK, A. R. [1979] Loran-C pulse transient propagation. DOT United States Coast Guard Report CG-D-52-79, NTIS Accession Number AD 077551, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Estados Unidos de América.
- JOHLER, J. R. y HOROWITZ, S. [marzo de 1974] Propagation of a Loran pulse over irregular, inhomogeneous ground. AGARD Conf. Proc. No. 144 on Electromagnetic wave propagation involving irregular surfaces and inhomogeneous media, 28-1 to 28-13. (Editado por el Dr. A. N. Ince, SHAPE Technical Centre, P.O. Box 174, La Haya, Países Bajos.) NTIS Accession Number AD A008583, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Estados Unidos de América.
- JOHLER, J. R., KELLAR, W. J. y WALTERS, L. C. [junio de 1956] Phase of the low radio-frequency ground wave. NBS Circular 573, Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, Estados Unidos de América.
- PRESSEY, B. G., ASHWELL, G. E. y FOWLER, C. S. [1953] The measurements of the phase velocity of ground-wave propagation at low frequencies over a land path. *Proc. IEE*, 100, Pt. III.
- SAETHER, K., y VESTMO, E. [1987] Loran-C signal stability study in North Norway. *Telektronikk* N^o. 1, pp. 89 - 94. Administración de Telecomunicaciones de Noruega, Oslo.
- SAMADDAR, S. N. [1979] The theory of Loran-C ground-wave propagation - A review. *Navigation*, Vol. 26, 3.
- SAMADDAR, S. N. [1980] Weather effects on Loran-C propagation. *Navigation*, Vol. 27, 1.
- STOKKE, K. N. [1988] Measurements of signals from a radio beacon. Influence of the ground conductivity. *Telektronikk* N^o 1, Administración de Telecomunicaciones de Noruega, Oslo.
- WAIT, J. R. [1970] *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. 2.^a edición, Pergamon Press, Oxford, Reino Unido.
-