



Medición de la Resonancia de Schumann

Edgardo Maffia. Senior Member IEEE. maffia@ieee.org
Electrónica Aplicada, Perú 952. (1063) Buenos Aires, Argentina.

Valentino Trainotti. Life Fellow IEEE. vtrainotti@ieee.org
Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires
Av. Paseo Colon 850. (1063) Buenos Aires, Argentina.

Walter Gustavo Fano. Member IEEE. gustavo.fano@ieee.org
Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires
Av. Paseo Colon 850. (1063) Buenos Aires, Argentina.

Norman Trench. Ingeniero Consultor. nortrench@gmail.com

14 de octubre de 2011

Autor corresponsal: E. Maffia info@detectores.com.ar

Palabras claves: Resonancia, Schumann, Campo magnético
Detección, Recepción.

Resumen

Se comunican detalles de las mediciones realizadas en la localidad de Villa Alpina, Cordoba, en el rango de frecuencia de 0.5 a 30 Hz, con la finalidad de obtener evidencias de emisiones de ondas electromagnéticas (EM) por partes de movimientos sísmicos. La necesidad de contar con una instrumentación con suficiente sensibilidad en zona de muy bajo ruido producido por el hombre, hace que la observación de las señales debidas al ruido atmosférico en zonas ecuatoriales y tropicales se puedan detectar preferentemente debido a la resonancia que presenta el sistema de las esferas terrestre e ionosferica respectivamente, llamada resonancia de Schumann. Esta detección con un nivel sobre el ruido de fondo natural es una indicación de la sensibilidad de la instrumentación que permitirá a posteriori la detección de señales de emisiones electromagnéticas provenientes de movimientos sísmicos a distancias moderadas entre el evento y la ubicación de la estación observadora.

Abstract The measurement of the Schumann resonance has been made at the location of Villa Alpina, Cordoba, Arg. in the frequency range of 0.5 to 30 Hz. This measurement is intended to get evidence of the electromagnetic precursors of earthquakes in a quiet zone. This location was chosen due to the very low artificial noise of the power lines radiation. In order to check the instrumentation the Schumann resonance gets the opportunity to determine the instrumentation sensitivity necessary to obtain the EM precursor measurement evidence. The details of the experimental procedure is explained in this paper.

1. Introducción

Los movimientos sísmicos son fenómenos poderosos que provocan graves daños y muchas víctimas humanas sobre la superficie terrestre cada año y, por lo tanto, son eventos que merecen una investigación exhaustiva en diferentes campos de la ciencia. Estudios realizados en el pasado reciente indican que los movimientos sísmicos son precedidos por señales electromagnéticas anómalas. Por esta causa es importante disponer de observatorios equipados con una instrumentación que permita supervisar en forma permanente el espectro de las frecuencias extremadamente bajas (ELF, 3 a 30 Hz), ubicados en zonas donde la probabilidad de la ocurrencia de tales movimientos es más elevada. Es importante, por lo tanto, que la distancia entre el evento sísmico y el sistema detector sea lo más reducida posible, de tal modo que el nivel de los precursores electromagnéticos sea suficiente para superar el ruido natural y artificial existente en la zona y permita una detección adecuada. Las fuentes principales del ruido natural son las descargas de las tormentas atmosféricas mientras que el ruido artificial es debido principalmente a la energía industrial (50 o 60 Hz) y la transmisión de señales de radiocomunicaciones dentro del espectro de frecuencias extremadamente, super, ultra y muy bajas (ELF, SLF, ULF y VLF), es decir un espectro de frecuencias sumamente amplio. Para mediciones preliminares se ha implementado una instrumentación elemental que permite detectar el campo magnético variable en el tiempo cuyas frecuencias se encuentran dentro del espectro entre 0.5 y 30 Hz (ELF). Es importante que los observatorios sean instalados en zonas alejadas de los centros urbanos para minimizar sus efecto interferentes a las posibles señales producidas por eventos sísmicos.

Por otro lado la probable generación de ondas electromagnéticas es debida a la microfracturación de la estructura cristalina de las rocas que constituyen las placas geológicas dando lugar a la formación de distribuciones desbalanceadas de cargas eléctricas de signo opuesto y, en consecuencia, la generación de campos eléctricos locales intensos [8],[9]. Las cargas eléctricas de signo opuesto creadas en las microfracturas constituyen dipolos eléctricos que tienen una vida media determinada por el tiempo de relajación del material. Las dimensiones de los dipolos pueden ser moduladas por las vibraciones mecánicas locales (Mognaschi 2000).

Cualquiera sea el mecanismo de generación de ondas electromagnéticas, un modelo posible consiste de un gran número de dipolos eléctricos cuya oscilación produce ondas electromagnéticas amortiguadas.

La detección se efectúa normalmente sobre la superficie terrestre, mientras que la generación de la onda se efectúa a alguna profundidad donde la presión entre las placas tectónicas produzca rupturas en el o en los materiales existentes. La dimensión lineal de la región focal de la superficie terrestre donde se producen la mayoría de los terremotos es de pocos kilómetros, mientras que la profundidad del evento puede ser menor que 50 km. No obstante, para eventos de mayor envergadura la profundidad puede ser mayor, alcanzando valores de hasta 600 km, es decir, alrededor de 10 % del radio terrestre medio ($R_t \cong 6370 \text{ km}$).

Suponiendo una radiación del tipo isotrópico, ya que la onda generada se irradia en todas direcciones, una parte solamente se dirigirá hacia la superficie terrestre donde existe la interfaz entre el suelo y la atmósfera. Como la propagación de ondas se efectúa en un medio cuasiconductor y la atmósfera (aire) es un medio dieléctrico prácticamente perfecto, habrá un ángulo crítico que per-

mitirá una reflexión en la interfaz que da lugar a una onda de superficie que viajará como una onda guiada por la superficie de la tierra. Tanto la onda que se propaga en el material de la corteza terrestre, como la que se propaga sobre la superficie sufrirán atenuaciones debido a la distancia y a la disipación en forma de calor en la conductividad del medio. Por lo tanto la atenuación en la corteza terrestre resulta [3]:

$$A = 10 \log(e^{1,99 \cdot 10^{-3} r \sqrt{f \sigma}}) \text{ dB} \quad (1)$$

Se observa que la atenuación se incrementa con la distancia y con la raíz de la frecuencia y la conductividad. De este modo, es importante detectar el fenómeno a la menor distancia del evento y para las menores frecuencias de espectro, so pena que el nivel de señal de la onda electromagnética se confunda con el ruido natural o artificial. Como ejemplo para una conductividad $\sigma = 10^{-2}$ S/m a una frecuencia $f=10$ Hz el valor de la atenuación se hace enorme a una distancia mayor que 10 km ($\alpha = 6,3 \cdot 10^{-4}$ Neper/m). Una manera de comprobar la sensibilidad de la instrumentación es poder detectar las resonancias de Schumann por encima del nivel de ruido natural mediante un sensor de campo magnético variable y un amplificador de muy bajo ruido en la banda de frecuencias extremadamente bajas (ELF, 3 a 30 Hz) y, además, de una computadora personal para visualizar el espectro.

2. Teoría de las Resonancias de Schumann

Si se considera a la tierra y a la ionósfera como dos esferas concéntricas que se comportan como una cavidad resonante, la frecuencia de los modos de resonancia serán del orden del radio de la tierra, lo que significa que serán de una frecuencia extremadamente baja. A estas frecuencias la tierra y la ionósfera se comportan aproximadamente como materiales conductores. Esto se comprueba efectuando la relación entre la conductividad σ , y el producto entre la permitividad y la pulsación angular ($\sigma/\omega\epsilon$). Dicho valor es mucho mayor que la unidad para los materiales conductores (Trainotti y Fano, 2003 [3])

La conductividad del mar es de aproximadamente $5S/m$ y la ionósfera se comporta como un reflector metálico de ondas electromagnéticas, pero en realidad se trata de un plasma (medio ionizado). Esta situación no es exactamente como la que corresponde a dos conductores perfectos pero se aproximará notablemente para los cálculos en frecuencias extremadamente bajas [1].

Si se plantean las ecuaciones de Maxwell del rotor, [1],[3] se tiene:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3)$$

Operando con estas dos expresiones resulta:

$$\frac{\omega^2}{c^2} \vec{B} - \nabla^2 \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Esta es una ecuación de Helmholtz en el vacío o aire. Es conveniente usar el modo de propagación Transverso Magnético (TM) porque posee las frecuencias

de resonancia más bajas que el modo Transverso Eléctrico (TE). En este modo de propagación (TM) la componente radial del campo magnético se anula. Las componentes de la densidad de flujo magnético \vec{B} (T) no dependen del ángulo ϕ , por lo tanto, la única componente que es distinta de cero es B_ϕ , esto conduce a que los campos sean:

$$\vec{B} = (0, 0, B_\phi) \quad (5)$$

$$\vec{E} = (E_r, E_\theta, 0) \quad (6)$$

Aplicando las condiciones de borde del campo eléctrico en la superficie de las esferas citadas, se obtiene finalmente la resonancia de Schumann [1]:

$$f_l = \frac{c}{2\pi a} \sqrt{l(l+1)} \quad (7)$$

Si se reemplazan los valores de $c = 3 \cdot 10^8$ m/s (velocidad de la luz) y $a = 6400$ km (radio medio de la tierra), resulta:

$$f_l = 7,46\sqrt{l(l+1)} \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Por lo tanto las frecuencias de resonancias para los distintos modos de propagación, resultan:

Cuadro 1: Resonancias de Schumann teóricas y experimentales.

n	f(Hz) Teo.	f(Hz) Exp.
1	10.55	7.8
2	18.274	14.1
3	25.844	20.3
4	33.364	32.5

Las primeras mediciones experimentales de la potencia espectral de ruido detectado en frecuencias extremadamente bajas, donde se pueden observar las resonancias de Schumann, han sido obtenidas por Balser y Wagner en 1960[2] (ver 1). Estas mediciones imponen un ajuste en la constante que multiplica la raíz cuadrada de la expresión teórica de la resonancia de Schumann, resultando finalmente:

$$f_l = 5,8\sqrt{l(l+1)} \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$



Figura 1: Bobina con 5 carretes de 20000 vueltas cada una insertados sobre 2 rieles de acero de 2m de longitud y una plaqueta que contiene el preamplificador.

3. Equipamiento Experimental y Mediciones

Para esta detección se elaboró un "Magnetómetro de Reluctancia Variable", que consiste de un inductor con una bobina arrollada sobre un núcleo de hierro y con un medidor de aguja muy sensible.



Figura 2: Sensor magnético encapsulado en un tubo de PVC, y la caja que contiene el amplificador y el indicador de aguja.

Para la realización práctica se bobinó el inductor sobre 5 carretes cada uno con 20000 espiras de alambre de 0.12 mm de diámetro y una resistencia resultante a la corriente continua de 4000Ω . El núcleo consistió de dos rieles metálicos de acero 1020 de 2 m de longitud. Este conjunto se puede ver en la Figura 1. Dicho conjunto se instaló dentro de un tubo de policloruro de vinilo (PVC) con tapas en sus extremos. En la Figura 2 se puede apreciar el sensor magnético terminado con la caja que contiene la parte electrónica y el correspondiente indicador de aguja. Dentro de la caja se instaló un amplificador de alta ganancia y un circuito de medición. Con la inquietud del Ing. Valentino Trainotti se modificó dicho instrumental para realizar la posible detección de precusores electromagnéticos producidos por movimientos sísmicos en la banda de ELF (3 a 30Hz).



Figura 3: Preparación del sensor magnético.

A fin de verificar la sensibilidad del sistema de detección se programó la medición de las resonancias de Schumann debido a la característica resonante de las esferas concéntricas constituidas por la superficie terrestre y la base de la ionósfera. No se tiene conocimiento de que se haya realizado la medición de tales resonancias en Sudamérica. La medición de la bobina resultante arrojó una inductancia cercana a 700 Henry (H), y una resistencia resultante a la corriente continua de 16000Ω . En la Figura 3 se muestra la preparación del sensor magnético.

Para la etapa frontal el receptor utiliza un circuito amplificador operacional de bajo ruido, que estaba disponible, seguido de un filtro de ranura de 40 dB de atenuación a la frecuencia industrial de 50 Hz. Se agregó una etapa postamplificadora para completar el receptor, cuya ganancia en la banda de ELF es

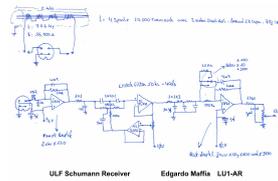


Figura 4: Circuito del amplificador de alta ganancia y bajo ruido y filtro de ranura para 50 Hz.



Figura 5: Foto del amplificador usado en la medición.

de 50000 veces (94dB), y cuya banda pasante para una caída de 6 dB se ubica entre 0,5 y 30 Hz. En la Figura 4, se indica el circuito original del receptor para ELF. En la Figura 5 se aprecia la caja metálica que contiene el receptor para ELF sin la Tapa de blindaje. La primera experiencia para la medición de las resonancias de Schumann se realizó el día 17 de Marzo de 2011 cerca de las 15hs en la localidad de Villa Alpina, provincia de Córdoba.



Figura 6: Ubicación del sensor magnético en el terreno para efectuar la primera medición de las resonancias de Schumann

En la Figura 6 se aprecia la ubicación del sensor en el terreno. El receptor y la correspondiente Laptop para el análisis del espectro se instaló en la cabaña del ingeniero Norman Trench. El lugar del emplazamiento es completamente adecuado para captar ambos fenómenos, los precursores electromagnéticos y las Resonancias de Schumann, ya que, las líneas eléctricas se encuentran alejadas en más de 20 km y, por tal causa se trata de un lugar de muy bajo ruido industrial. Para la primera medición se contó además con el apoyo del Doctor Walter Gustavo Fano para contabilizar los datos y los resultados. El primer espectrograma se realizó utilizando el programa Spectrum Lab que ha permitido la visualización de las Resonancias de Schumann con un nivel muy próximo al nivel del ruido natural o ruido de fondo. Mediciones adicionales realizadas a posteriori por el Ing. Trench modificando la etapa frontal del receptor con un circuito integrado de menor nivel de ruido han permitido observar las Reso-

nancias con una mejor resolución respecto del ruido natural. Además, el nivel de las señales correspondientes a las Resonancias o modos de propagación de Schumann depende de la hora de observación, como se ha demostrado al realizar mediciones a distintas horas del día. Los niveles mayores corresponden a horas de la tarde y a las primeras horas de la noche. Seguramente esto es debido a la mayor actividad atmosférica en las zonas ecuatoriales y tropicales por la tarde donde el valor de la temperatura es máximo debido a la radiación solar. En la Figura 7 se pueden ver claramente los tres primeros modos de las Resonancias de Schumann en 7.8, 14 y 20 Hz en la pantalla de la Laptop.

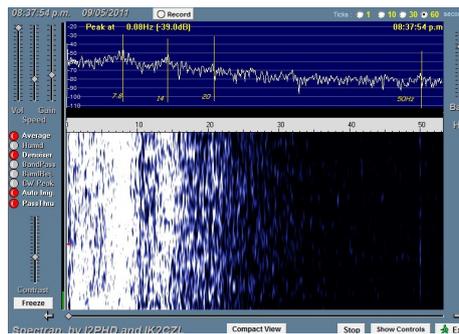


Figura 7: Medición de las Resonancias de Schumann. Visualización de las resonancias en el analizador de espectro. Se puede observar la señal de frecuencia de la energía industrial (50Hz)

4. Conclusiones

En este proyecto se realizaron las mediciones de las Resonancias de Schumann en la localidad de Villa Alpina, Cordoba, en el rango de frecuencia de 0.5 a 30 Hz. Esta medición permite tener confianza en base a la sensibilidad del equipamiento utilizado de detectar posibles precursores electromagnéticos correspondientes a movimientos sísmicos de las capas tectónicas. La ubicación de Villa Alpina se considera adecuada ya que se encuentra en las faldas del cerro Champaqui que corresponde a la cordillera de los Comechingones en la cual se producen frecuentes movimientos sísmicos durante el año. Actualmente se dispone del equipamiento experimental básico instalado en dicha Localidad a cargo del Ing Trench que realizará mediciones a lo largo del año con la finalidad de detectar los mencionados precursores.

Referencias

- [1] Jackson, J. D., *Classical Electrodynamics.*, J. Wiley, USA, 1998.
- [2] Balzer, M. and Wagner, C.A. *Observations of earth ionosphere cavity resonance.*, Nature, Vol. 188, 638-641, 1960.
- [3] Trainotti, V., Fano W. G. and Dorado L., *Ingeniería Electromagnética*, Tomo I, Ed. Nueva Librería, Buenos Aires, Argentina, 2003.
- [4] Trainotti, V., Fano W. G. and Dorado L., *Ingeniería Electromagnética*, Tomo II, Ed. Nueva Librería, Buenos Aires, Argentina, 2005.

- [5] Jordan, E. C., *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, Prentice-Hall, New York, 1950.
- [6] Parkhomenko, E. I., *Electrical Properties of Rocks.*, Plenum Press, New York, Usa, 1967.
- [7] Satori, G. et.al. *Monitoring Schumann resonances*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol. 58, No, 13, pp. 1475-1481. 1996
- [8] Mogi, K. *Rock Fracture.*, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, vol. 1. Annual Rev. Inc., Palo Alto, 1973
- [9] Bleier, T. et. al. *Earthquake Predictor.*, IEEE Spectrum, Dec. 2005.
- [10] Atkinson, B, K., Rowlings R, D. *Acoustic Emissions diuring stress corrosion cracking in rocks.*, in: Simpson and Richard (pp.605-616), Earthquake Prediction, American Geophysic Union, Washington DC, 1981.
- [11] Brace, W. F. and Orange A. S., *Electrical resisitivity changes in saturated rocks during fractures and frictional sliding.*, J.Geophys. Res, 73, 1433, 1968.
- [12] Brace, W. F. and Orange A. S., *Further studies of the effect of pressure of electrical resistivity of rocks.*, J.Geophys. Res, 73, 5407, 1968.
- [13] Brady, B. T. and Rowell, G. A. *Laboratory Investigation of Electrodynamic of rock fracture.*, Nature, 321, 488, 1986.
- [14] Bykova, V. V. et. al. *Electron emission during fracturing of rocks.*, Izv, Russ. Acad. Sci. Phys. Solid Earth., 23, 690, 1987.
- [15] Dea, J. Y. et. al. *Observation of seismo- Electromagnetic Earthquake precursor radiation signatures along Southern California Fault Zones.*, Can. J. Phys., 69, 1138, 1991.
- [16] Dea, J. Y. et. al. *Long term ELF background Noise Measurement.*, Phys., Earth Planet Inter. 77, 109, 1993.
- [17] Enomoto, Y. and Hashimoto, H. *Transient Electrical Activity Acompaning Rock Under Identation.*, Tectonophysics., 211, 337, 1992.
- [18] Gershenzon, N. J. et. al. *On the Electromagnetic Field of an Earthquake Focus.*, Phys., Earth Planet Inter. 77, 13, 1993.
- [19] Gokhberg, M. B. et. al. *Electromagnetic Effects During Rupture of Earth's Crust.*, Izv, Russ. Acad. Sci. Phys. Solid Earth., 21, 52, 1985.
- [20] Kingsley, S. P. et. al. *On the Possibilities for detecting Radio Emissions from Earthquakes.*, Il Nuovo Cimento., 12, 117, 1989.
- [21] Martelli, G. and Cerroni, P. *On the Theory of Radioemission from Macroscopic Hypervelocity Impact and Rock Fracturing.*, Phys., Earth Planet Inter. 40, 316, 1985.
- [22] O'keefe, S. G. and Thiel, D. V. *Electromagnetic Emissions During Rock Blasting.*, Geophys. Res. Lett 18, 889, 1991.
- [23] Park, S. K. *Workshop on Low Frequency Electrical Precursors to Earthquake.*, Eos, Trans. Am. Geophys. Union, 73, 491, 1992.
- [24] Varotsos, P. and Lazaridou, M. *Latest Aspect of Earthquake Baset on Seismic Electric Signals.*, Tectonophysics., 138, 321, 1991.
- [25] Yamada, Y. et. al. *Electromagnetic and Acoustic Emission Associated With Rock Fracture.*, Phys., Earth Planet Inter. 57, 157, 1989.