

SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS DE ALTA RESOLUCIÓN CON SENSORES PASIVOS

Alguacil, G.⁽¹⁾; Ortiz, R.⁽²⁾; Olmedillas, J.C.⁽³⁾; Abril, M.⁽¹⁾; Peregrín, A.⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto Andaluz de Geofísica y P.D.S. Universidad de Granada.

⁽²⁾Dep. Volcanología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, C.S.I.C. Madrid.

⁽³⁾Servei Geològic de Catalunya. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.

Resumen: *Las estimaciones de sensibilidad y margen dinámico de sistemas sísmicos basados en geófonos pasivos electromagnéticos convencionales de periodo propio $T_0=1$ s o similar muestran que sus posibilidades no se agotan con sistemas de adquisición de baja o media resolución, sino que los de 24 bits pueden proporcionar registros de buena calidad en la banda de 0.1 a 30 Hz o más. Para conseguir el máximo margen dinámico (más de 120 dB), es preferible prescindir de preamplificador analógico y de circuitos de extensión de respuesta, conectando directamente el geófono al conversor A/D. Una función de transferencia plana para velocidad del suelo a periodos más largos que T_0 puede obtenerse con el uso de un filtro digital recursivo de ecualización, del cual se muestra un ejemplo, que es posible realizar en tiempo de adquisición o posteriormente.*

Abstract: *The estimation of sensitivity and dynamic range of seismic systems based on standard electromagnetic geophones with free period about $T_0=1$ sec shows that the low or medium-resolution data-acquisition systems do not take the most of them. Instead, 24 bits ones may yield good-quality records in the frequency band of 0.1 to 30 Hz or beyond. To achieve the maximum dynamic range possible (more than 120 dB), it should be avoided the use of analog pre-amplifier or response-extending circuits, the geophone being connected directly to the A/D converter. A flat velocity transfer function for periods longer than T_0 may be obtained with a digital recursive equalization filter, an example of which is shown, either implemented at acquisition-time or later off-line.*

Introducción

El registro sísmico en forma numérica se ha generalizado paralelamente al desarrollo de la velocidad de proceso y la capacidad de almacenamiento de los sistemas informáticos. La alta calidad de los equipos sísmicos de última generación se basa en sensores de banda ancha (BB) (p.e. Usher, Burch & Guralp, 1979; Steim y Wielandt, 1985), útiles en un amplio espectro de frecuencias, y en sistemas de adquisición de datos de alta resolución (SADAR, en adelante) - hasta 24 bits -, lo que proporciona registros de muy alta dinámica. Estos equipos requieren en general instalaciones acondicionadas, temperatura estable, y generalmente un suministro de potencia no despreciable, por lo que su uso en campo, especialmente en estaciones portátiles, es muy limitado. El hecho de que sensores y SADAR se hayan desarrollado a un tiempo y el elevado coste de algunos de estos equipos comerciales, ha llevado a la asociación de ambos y a atribuir el amplio margen dinámico a estos sistemas en exclusiva. Sin embargo, los sensores electromagnéticos pasivos, de amplia difusión, menor coste y mayor robustez, se han utilizado clásicamente con sistemas de adquisición de resolución limitada, cuya falta de margen dinámico se ha atribuido erróneamente a los sensores. Mostraremos que este tipo de sensores conectado a SADAR puede proporcionar excelente registros a menor coste y en circunstancias en las que

probablemente un sismómetro de banda ancha no sería adecuado o al menos no estaría justificado, si bien indiscutiblemente éstos tienen mejores prestaciones en general, especialmente a bajas frecuencias.

Modelos y cálculo

Los límites en la sensibilidad de los sensores pasivos ha sido discutida por Reidesel, Moore & Orcutt (1990), Rodgers (1992) y Alguacil (1996). Se ha demostrado la validez de los modelos de ruido tanto para los sensores propiamente dichos, como para los preamplificadores asociados y su acoplamiento mutuo. En estos estudios queda de manifiesto que la principal contribución al ruido instrumental - y por tanto la limitación a la sensibilidad - viene dada por la etapa de entrada del amplificador sísmico. En sistemas de adquisición de 12, 14 o 16 bits, éste resulta necesario para elevar el nivel de salida del sensor hasta la resolución del conversor. Sin embargo la amplificación lleva consigo una pérdida de margen dinámico, por otra parte limitado a respectivamente 72, 84 ó 96dB en estos casos. Cabe resaltar, por tanto que no es el geófono el responsable de dicha limitación.

Los modernos conversores de 18 o más bits de resolución utilizan en su mayoría - en todos los casos si son de 24 - la técnica delta-sigma, asociada físicamente a los dispositivos MOS de transferencia de carga (p.e. Analog Devices, 1995). Esto se traduce en una etapa de entrada esencialmente no ruidosa, ya que transfiere carga de una capacidad a otra prácticamente sin elementos disipativos. Esto ha hecho posible para algunos dispositivos incluso elegir distintas ganancias, seleccionadas de forma numérica, lo que aumenta aun más el margen dinámico, si bien el cambio de ganancia durante la adquisición trae consigo la pérdida de algunas muestras. La alta resolución de estos dispositivos está basada en una técnica de sobre-muestreo seguido de filtrado digital. La mayoría de ellos utilizan filtros FIR (no-recursivos) con un elevado número de coeficientes, seguidos de diezmado. Por esta razón las frecuencias de muestreo efectivas que alcanzan no pueden ser muy altas. Esta característica, junto con el diseño de su etapa de entrada hace que estos conversores sólo sea adecuados al seguimiento de un canal por dispositivo y no resulte conveniente multiplexar.

Para un fondo de escala en tensión de ± 5 V, un conversor de 24 bits tendrá una sensibilidad nominal de $10/2^{24}$ V. En la figura 1 se compara con el nivel de ruido estimado a la salida de un geófono y con la de un preamplificador sísmico típico. Los valores de densidad espectral de ruido se han convertido en valores de pico como se describe en Alguacil (1996), siguiendo el criterio de Steim y Wielandt (1985). En la misma figura se representa el nivel de saturación, cuya relación con la sensibilidad nos da el margen dinámico. La sensibilidad expresada en términos de la densidad espectral de aceleración del suelo equivalente se representa en la figura 2 para tres sistemas: un geófono solo, el mismo con un preamplificador típico y el sistema geófono - conversor de 24 bits. La densidad espectral PSD_c del ruido de cuantización del conversor es plana, como es bien conocido, y vale para un conversor de n bits con fondo de escala en tensión u y con un intervalo entre muestras Δt (p.e. Otnes y Enochson, 1972)

$$PSD_c = \frac{\Delta t}{6} \frac{u^2}{2^{2n}}$$

Se ha calculado el nivel pico a pico de saturación para estos sistemas en términos de la aceleración del suelo equivalente. Para ello se ha dividido la amplitud correspondiente de tensión a la salida por la amplificación instrumental a cada frecuencia. El límite impuesto por el tope mecánico del geófono se ha calculado utilizando la función de transferencia desplazamiento de la masa - aceleración del suelo. Claro es que de este modo se supone una excitación del suelo

sinusoidal. En la figura 3 se representan estos límites junto con los valores de ruido expresados en aceleración del suelo equivalente. Puede apreciarse que el correspondiente a un geófono sin

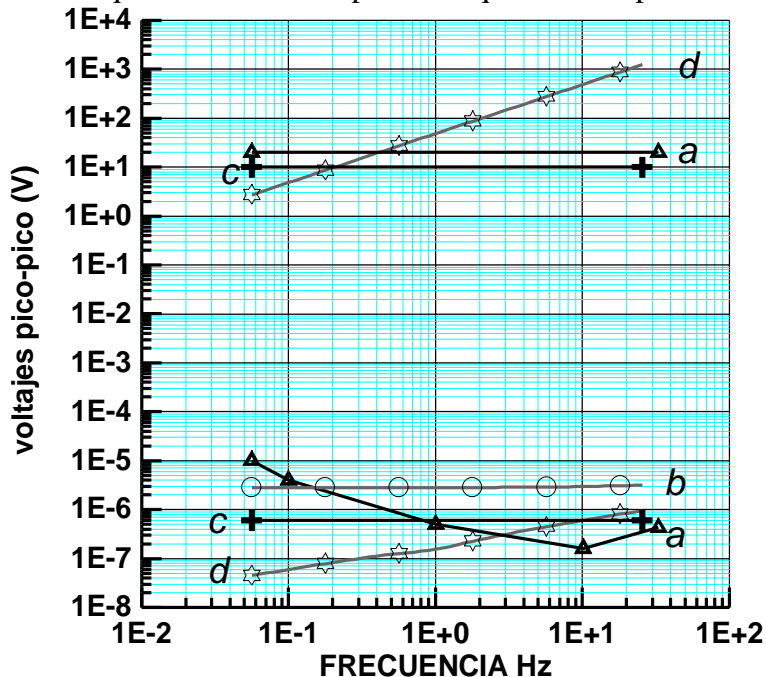


Figura 1. Niveles de ruido y de saturación en voltios pico a pico para varios sistemas: a) Guralp CMG-40 para referencia, b) Geófono Mark L4-C con preamplificador típico, c) convertor de 24 bits con fondo de escala $\pm 5V$, d) Geófono Mark sin preamplificador. La relación entre el nivel de saturación y el de ruido es una estimación del margen dinámico.

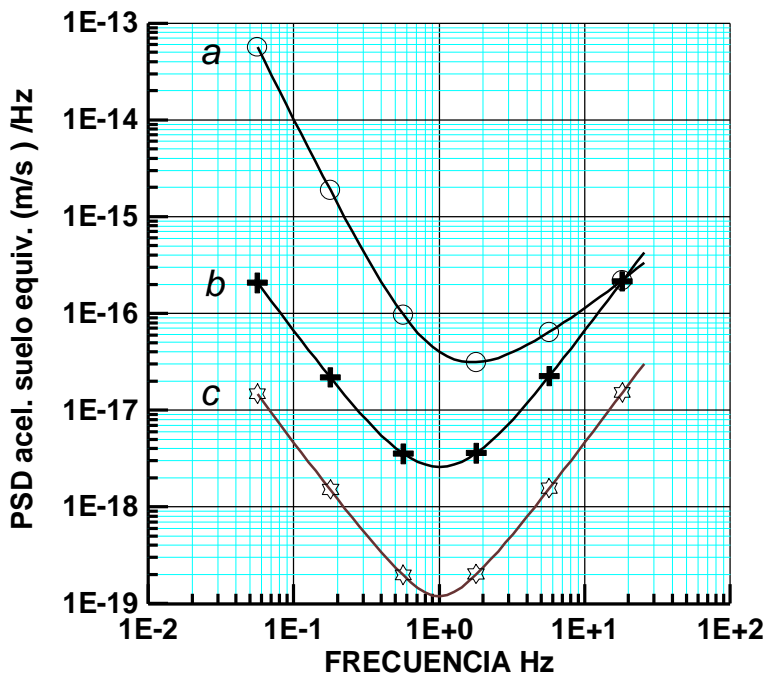


Figura 2. Densidad espectral de aceleración de ruido equivalente del suelo para tres sistemas: a) geófono Mark L4-C solo, b) ídem conectado a un convertor ideal de 24 bits, c) el mismo geófono con preamplificador típico. Obsérvese en este último caso el considerable aumento a baja frecuencia, debido al ruido 1/f del preamplificador.

preamplificar directamente conectado a un convertor A/D de 24 bits es ligeramente mayor que el del mismo geófono preamplificado. Sin embargo la saturación ocurre antes en este caso. Es de notar la discrepancia entre las curvas de ruido debidas al preamplificador y al convertor si se expresan en valores de pico o en densidad espectral. Es debido a la distinta relación entre el valor de pico y el *rms* en ambos casos, ya que se trata de densidades de probabilidad *gaussiana* y plana respectivamente (Otnes y Enochson, 1972).

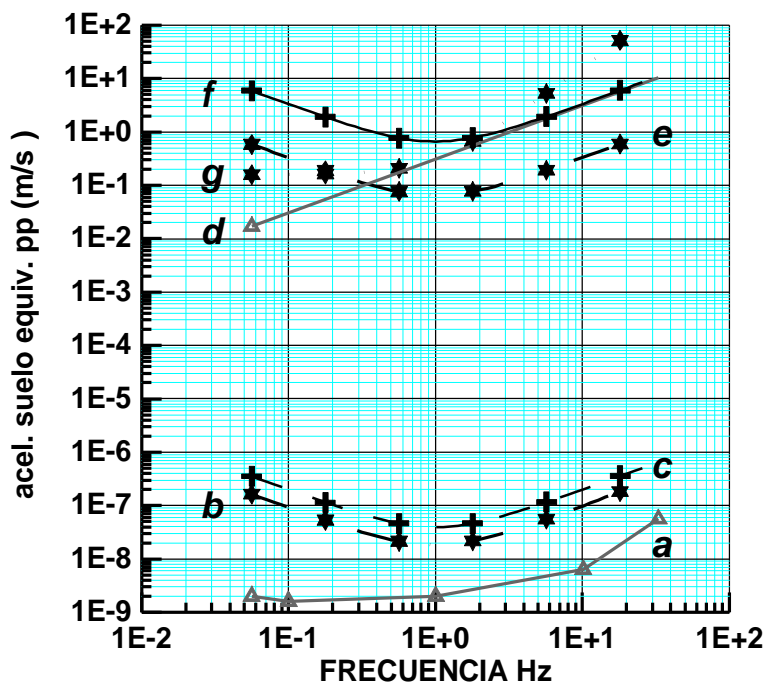


Figura 3. Niveles de ruido y de saturación para varios sistemas, expresados como la aceleración del suelo equivalente de pico a pico: a) ruido generado en un Guralp CMG-40, por referencia, b) id. en un Mark L4-C de 1Hz con preamplificador, c) id. en el mismo sensor con convertor de 24 bits, d) nivel de recorte de Guralp CMG 40 (salida de 400 V/m/s), e) nivel de recorte del preamplificador para el caso b, f) saturación del convertor A/D, g) nivel de tope mecánico del sensor Mark.

Ampliación de la respuesta

Los geófonos de corto periodo y de periodo intermedio se han usado en los últimos años con circuitos de extensión de su respuesta hacia las bajas frecuencias (p.e. Lennartz Electronic, 1987; Ortiz y Correig, 1991; Dost, 1988), de modo que se aprovechen las características de robustez, menor peso y bajo coste al tiempo que se eleva el nivel de la señal a baja frecuencia hasta superar la sensibilidad del convertor. Si éste es de alta resolución, estos dispositivos no mejorarían la sensibilidad, ya que el ruido de cualquier preamplificador analógico superará el del convertor. Es preferible en este caso, si se desea obtener una respuesta plana en una banda ampliada, realizar la ecualización en forma numérica, bien en tiempo de adquisición, bien en tratamiento posterior. Como ejemplos, en la figura 4 se muestran registros obtenidos con un equipo estándar de banda ancha (sensor Streckeissen SS2 y sistema de adquisición Quanterra), a partir de los cuales se ha simulado los registros que se obtendrían con un sensor de 1 Hz y un sistema de adquisición de 24 bits. De éstos se han generado por filtrado recursivo registros “de banda ampliada” hasta 10 s. En la figura 5 puede verse un registro real realizado con un sensor Mark L4-C de 1 Hz y su correspondiente ecualizado hasta 10 s por el mismo filtro recursivo, y el efecto de éste sobre la función de transferencia del sistema.

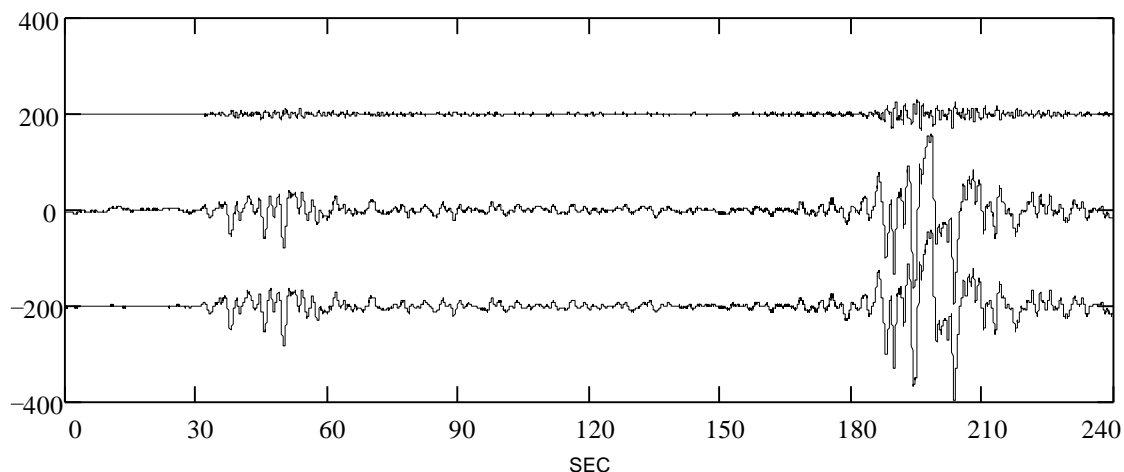


Figura 4. Efecto de la ampliación de respuesta plana con un filtro digital recursivo IIR. Trazas superior: registro de un telesismo con sensor de 1Hz simulado a partir del registro con uno de banda ancha. A partir del original se ha simulado asimismo el correspondiente a un sensor de $T_0=10s$ (traza central). De la traza superior se ha simulado un conversor A/D de 24 bits, truncando a enteros, y se ha obtenido la traza inferior por un filtro recursivo de equalización para una respuesta equivalente al de 10s (traza inferior).

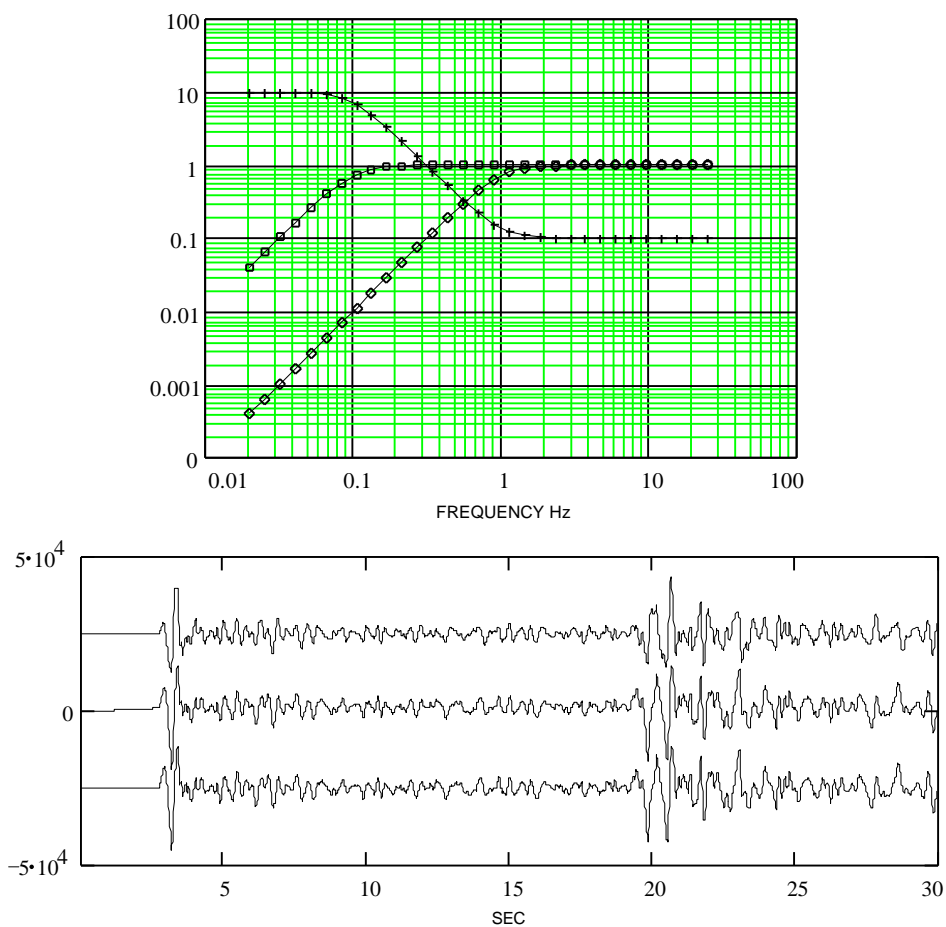


Figura 5. Efecto de la equalización digital, como la figura 4. Arriba, curvas de amplificación normalizadas para un sensor de 1Hz (rombos), el filtro digital de ampliación de respuesta (cruces) y la combinación de ambos (cuadrados), equivalente a la de un sensor de 10 s. Abajo, tres trazas de un sismo local: superior, con sensor de 1Hz y sistema A/D de 24 bits, central con sensor de 10 s, e inferior, con equalización digital equivalente.

Discusión y conclusiones

De las tres primeras figuras se sigue a) que es posible alcanzar mejor sensibilidad con un sistema de adquisición de 24 bits conectado directamente a un geófono que con el mismo preamplificado b) que el margen dinámico que se puede obtener, expresado como la relación entre el nivel de saturación del sistema y su nivel de ruido supera los 120 dB al menos en una banda de 0.1 a 30 Hz, lo que justifica plenamente el uso de estos sistemas de adquisición. Conviene mencionar que los conversores de más bajo coste tienen una resolución efectiva algo menor, dependiente de la frecuencia de muestreo (Analog Devices, 199*). Por otra parte no se han considerado en este estudio otras posibles restricciones en la dinámica, como la distorsión no-lineal, que es mucho menor en sensores de banda ancha al ser sistemas realimentados. En todo caso, la falta de dinámica de muchos equipos convencionales ampliamente utilizados en redes permanentes y en estaciones temporales no puede atribuirse a los sensores, sino a los sistemas de adquisición empleados.

La estimación del nivel de aceleración del suelo para la que se alcanza la saturación en los ejemplos mencionados sugiere que un sensor de 1Hz con SADAR de 24 bits puede registrar en escala la mayor parte de los eventos locales y regionales de magnitud moderada, si bien se alcanza la máxima sensibilidad posible con una pequeña amplificación, que puede ser la incorporada en el propio convertor A/D de tipo delta-sigma.

Por tanto, muchos sistemas sísmicos actualmente operativos en redes locales y regionales pueden ser mejorados substancialmente sin sustituir los sensores. Si bien es cierto que los costes del sensor y del sistema de adquisición deberían ser equilibrados.

Si bien es indudable que los sensores de banda ancha de última generación proporcionan la máxima calidad de registro, en muchos casos su uso no es obligado y hasta es ventajoso en términos económicos, de robustez y de portabilidad usar sensores pasivos electromagnéticos.

Bibliografía

- Alguacil, G. (1996): Prestaciones de los sismómetros de respuesta extendida. *Homenaje en honor al Profesor Fernando de Miguel Martínez*. Universidad de Granada. Granada.
- Analog Devices (1995): *LC²MOS signal conditioning ADC. AD7710*. Analog Devices, Inc., Norwood MA02062-9106, USA.
- Dost, B. (1988). The NARS array. A seismic experiment in Western Europe. *Geologica Ultraiectina*, **47**, 117 pp. Instituut voor Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit te Utrecht.
- Lennartz Electronic GmbH (1987): *LE-3D Technical Data*. Tübingen.
- Ortiz, R. y Correig, A. M. (1991). On the use of geophones with extended response in microseismic networks. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*. **2**.
- Otnes, R.K. & Enochson (1972): *Digital Time Series Analysis*. John Wiley & Sons. London. 445 pp.
- Reidesel, M.A; Moore, R.D. & Orcutt, J.A. (1990). Limits of sensitivity of inertial seismometers with velocity transducers and electronic amplifiers. *Bull. Seism. Soc. Am.* **80**, 1725-1752.
- Rodgers, P.W. (1992). Frequency limits for seismometers as determined from signal-to-noise ratios. Part 1. The electromagnetic seismometer. *Bull. Seism. Soc. Am.* **82**, 1071-1098.
- Steim, J.M. y Wielandt, E. (1985). *Report on the Very Broad Band Seismograph*. Harvard University, Cambridge, Massachusetts. 34 pp.
- Usher, M.J., Burch, R.F. & Guralp, C. (1979). Wide-Band Feedback Seismometers. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **18**. 18-50.