

INSTRUMENTO PARA LA MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO Y ÁNGULO CON ALTA RESOLUCIÓN UTILIZANDO EL DSP TMS320C50

Benjamín Valera O. y Gerardo Ruíz B.
Centro de Instrumentos UNAM, Laboratorio de Metrología
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México D.F.
Tel. 56 22 86 02 ext. 122, Fax 56 22 86 24, E-mail: valerab@aleph.cinstrum.unam.mx

Resumen: El trabajo describe la implementación de un instrumento para la medición de desplazamiento y ángulo con alta resolución utilizando el procesador digital de señales TMS320C50. El instrumento mantiene la misma resolución para todo el alcance de medición, superando el desempeño de instrumentos analógicos similares. Los procedimientos de calibración y ajuste se realizan mediante software. Las lecturas son altamente inmunes a las variaciones ambientales o de valores nominales en los componentes y ruido electrónico. Una interfase de usuario para PC le proporciona calidad de producto terminado.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad en el Centro de Instrumentos UNAM, particularmente en el Laboratorio de Metrología, se desempeñan actividades de medición dimensionales acreditadas por la Entidad Mexicana de Acreditación, EMA, que requieren un alto grado de exactitud y resolución. Nuestro interés reciente ha sido enfocado al desarrollo de instrumentos propios para la medición que introduzcan ideas originales planteadas con base en la experiencia adquirida por los académicos y alumnos colaborando con el Laboratorio [1].

Por otra parte, la disponibilidad de codificadores ópticos con cada vez más altas resoluciones, tienden a desplazar a los tradicionales transductores LVDT/RVDT (Transformadores Diferenciales Linealmente/Angularmente Variables) de efecto inductivo. No obstante, los dispositivos LVDT/RVDT siguen teniendo una amplia presencia en el campo de la metrología dimensional, debido a su confiabilidad de operación bajo ambientes industriales de desgaste y suciedad.

Sin embargo, los altos grados de exactitud y resolución requeridos en los transductores LVDT/RVDT, sugieren el empleo de técnicas recientes basadas en procesamiento digital de señales, para que la medición de ángulo y desplazamiento resulte una alternativa viable.

El propósito de nuestro trabajo es desarrollar y experimentar con técnicas de procesamiento digital de señales que superen el desempeño de los equipos analógicos tradicionales. La justificación que planteamos no radica en la electrónica empleada, sino en la programación del algoritmo de medición, que es el área en donde buscamos innovar [2, 3]. En éste sentido, usamos una

plataforma hardware con el Procesador Digital de Señales, DSP, TMS320C50 [4, 5] como herramienta de desarrollo para la implementación de algoritmos de medición originales.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Recordando que el LVDT/RVDT maneja señales sinusoidales y que el desplazamiento del vástago es proporcional a la relación de transformación, se propone el sistema para la medición de desplazamiento y ángulo mostrado en la figura 1.

En la figura 1, el DSP sintetiza una forma de onda senoidal con alta estabilidad en frecuencia y amplitud y baja distorsión armónica para impulsar el primario del LVDT/RVDT. Las señales en el primario y secundario son digitalizadas y almacenadas de vuelta al DSP. Entonces el algoritmo de medición en el DSP correlaciona ambas señales para proporcionar un valor de medición de desplazamiento en el núcleo del LVDT/RVDT.

En la siguiente descripción, refiérase a la figura 1 para la explicación, la notación y el significado de las siglas empleadas. El amplificador a la salida del DAC está en configuración de seguidor y la red de acoplamiento típico para señales de audio, formada por C_1 , C_2 y R_1 , sirve para transferir máxima potencia al embobinado primario. Como disponemos de 2 entradas analógicas en el ADC del AIC, IN y AUX, la entrada del LVDT/RVDT también es una de las entradas del AIC. En este caso se conecta V_1 a la entrada IN. El acondicionador de señal es un amplificador operacional en configuración diferencial. Esto sirve para eliminar el ruido de modo común y proporcionarle ganancia a la señal del secundario. La salida de este amplificador, V_2 , alimenta a la entrada AUX del AIC.

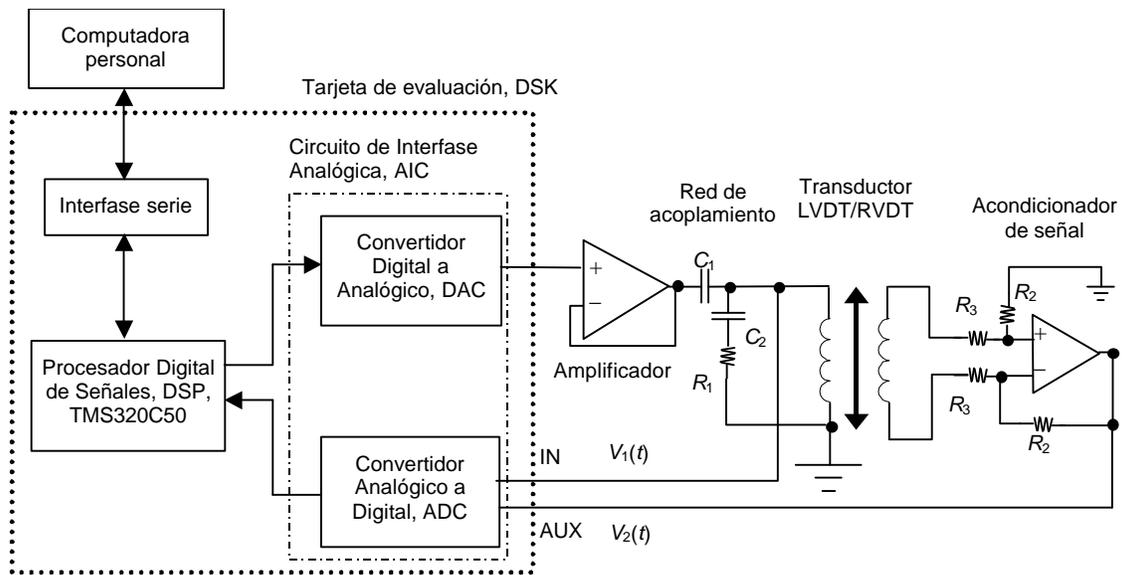


Fig. 1 Instrumento para la medición de desplazamiento y ángulo.

Los elementos externos a la tarjeta, como son la red de acoplamiento, el amplificador y el acondicionador de señal, están en una placa de circuito impreso y son acoplados a la DSK a través de los conectores de expansión.

Para analizar el procesamiento de datos requerido para obtener el desplazamiento del LVDT/RVDT, hay que tener en cuenta que su primario se alimenta con una señal sinusoidal, V_1 , de amplitud y frecuencia fijas

$$V_1(t) = A_1 \cos(\omega t)$$

en donde A_1 es la amplitud y ω la frecuencia. La amplitud de la senoide en el secundario, V_2 , varía desde cero hasta un valor máximo A_{max} ,

$$V_2(t) = \pm A_2 \cos(\omega t - f) + r(t)$$

en donde $0 \leq A_2 \leq A_{max}$, f es la fase relativa a V_1 y $r(t)$ es el ruido. La variación de A_2 en conjunto con la discriminación de signo (cambio de fase de 180°) nos proporcionan la lectura de desplazamiento signada. Las dos sinusoidales anteriores se digitalizan con convertidores analógicos a digital de 14 bits y se toman 4 muestras por periodo de cada una de ellas; esto se debe a las características del AIC, ya que su velocidad máxima de muestreo es de 19,2kHz. Debido a estas características del AIC, se genera una señal sinusoidal de 4,8kHz

(19,2kHz/4) para que se puedan obtener 4 muestras por periodo de las señales de entrada.

La resolución teórica en escala completa de ± 1000 con 14 bits es de 0,1221 y no de 0,1 como se requiere, pero como se verá más adelante en los resultados, el algoritmo de procesamiento interpola en un nivel sub-muestra y obtiene lecturas estables con resolución de 0,1.

El ruido a la salida del secundario es de modo común así que es eliminado con el amplificador diferencial. También existe un rizo en los voltajes V_1 y V_2 que se debe al oscilador de alta frecuencia. Como este ruido es de alta frecuencia, no afecta al desempeño del sistema, ya que es absorbido por el algoritmo de medición (son las componentes de alta frecuencia y éstas son filtradas por el algoritmo de medición).

Para obtener la lectura, se debe obtener primero la relación de transformación a

$$a = \frac{A_2}{A_1} \quad (1)$$

Entonces para discriminar el signo de la lectura, se debe obtener la fase f .

El valor de la amplitud de una señal sinusoidal digitalizada se puede obtener de varias formas, la elección de una de ellas depende del grado de exactitud y dificultad que se requieran.

ALGORITMO DE MEDICIÓN

Cálculo de la relación de transformación

Para calcular el valor de la amplitud de una señal sinusoidal, se obtiene la magnitud de la componente fundamental, f_0 , de la transformada de Fourier [6]. La implementación de la transformación de Fourier corresponde al algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier, FFT. De (1)

$$a = \frac{\text{abs}\{\text{FFT}\{V_2(t)\}_{f=f_0}\}}{\text{abs}\{\text{FFT}\{V_1(t)\}_{f=f_0}\}} \quad (2)$$

en donde abs denota al operador con valor absoluto, V_2 es la señal en el secundario y V_1 la señal en el primario. En nuestro caso se toman 4 muestras por periodo y el cálculo de la transformada de Fourier se realiza con 64 muestras de la señal, es decir, 16 periodos. Por lo tanto, la espiga que contiene la información sobre la amplitud y fase de la señal es la espiga número 16, es decir, en (2) $f_0=16$. Para obtener la amplitud del numerador y denominador de (2), basta calcular el módulo de la componente en la frecuencia correspondiente. La forma más sencilla, si la representación de los números complejos es binómica (nuestro caso), es obtener la raíz cuadrada de la suma de las dos partes al cuadrado [7].

Cálculo de la fase

Otro aspecto importante es obtener el valor de la fase, f , de la señal del secundario a partir del resultado de la FFT. El valor de fase que se toma como referencia es el del primario; si la fase del secundario es cercana a esta fase, se enviará un resultado positivo a la computadora, de lo contrario se enviará un valor negativo.

Para obtener la fase, se obtiene la tangente inversa, \tan^{-1} , de la relación del negativo de la parte imaginaria entre la real de la componente del espectro, es decir:

$$f = \tan^{-1}\left(-\frac{b}{a}\right)$$

Donde a y b son la parte real e imaginaria de la componente en frecuencia respectivamente.

Para evitar el cálculo de la tangente inversa se pueden analizar algunas propiedades de la función tangente para saber cuándo existe un cambio de fase.

$$\tan(f) = \frac{b}{a}$$

Cuando existe un cambio de fase de 180° las dos componentes cambian de signo; pero si la componente mayor cambia de signo, existe al menos un desfase de 45° . Por lo tanto, para verificar si hubo un cambio de fase se pueden verificar los signos de la parte mayor (real o imaginaria) de la componente en frecuencia; si son iguales es que no hubo desfase y la lectura es positiva, si hubo cambio de signo es que el palpador se dirige hacia el otro sentido y la lectura es negativa.

PROGRAMACIÓN DEL DSP

El método propuesto es, entonces, obtener la amplitud de la señal de entrada y de la señal de salida, hacer la correlación entre las señales y obtener el signo de la lectura a partir de la fase. Para estabilizar la lectura contra variaciones del tiempo se obtiene el promedio de 10 lecturas y se envía a la computadora para ser mostrado.

En resumen, el DSP tiene que realizar 4 tareas importantes (figura 2) casi todas al mismo tiempo. 1) Generar la señal sinusoidal que alimentará la entrada del transductor. Esta señal siempre debe estar presente y debe tener poca distorsión armónica. 2) Hacer la adquisición de datos de las señales de entrada. Esta tarea no se tiene que realizar en todo momento; se realiza antes de calcular cada lectura. 3) Realizar el procesamiento para obtener la lectura. Esta tarea se realiza después del muestreo de las señales. 4) Transmitir los resultados a la PC. Esta tarea se realiza al final del procesamiento.

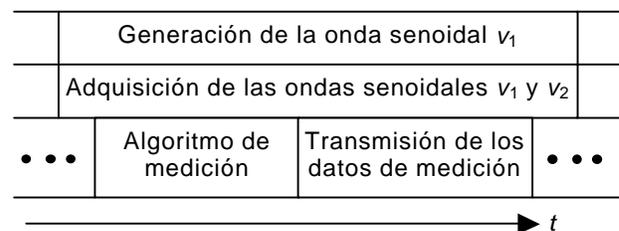


Fig. 2 Tareas que desempeña el DSP.

Para facilitar la programación, es más fácil hacer que el DSP se mantenga muestreando la señal de entrada en todo momento aunque la actualización de datos sólo se lleve a cabo durante la adquisición. Así en la tarjeta se están realizando 3 tareas al mismo tiempo.

PROGRAMA PARA PC

El programa para PC está desarrollado en Visual C++, utilizando Programación Orientada a Objetos, OOP, y las Clases Fundacionales de Microsoft, MFC. De esta forma se desarrollan programas amigables y fáciles de utilizar. El programa utiliza el puerto serie RS232 para establecer la comunicación con el DSP. Cuando el puerto está en operación, verifica si el DSP está conectado. Cuando no lo detecta termina con el programa. Cuando lo detecta carga el programa en ensamblador en la DSK.

Una vez que la tarjeta DSK está ejecutando el programa ensamblador, la PC espera un evento por el puerto serie. Si llegan datos por el puerto serie verifica que el último dato sea el dato de control. Si es así, entonces el programa ya se sincronizó con la tarjeta y los datos son válidos. El dato es leído, ajustado y mostrado en pantalla.

RESULTADOS

Se realizaron dos ejercicios de calibración usando patrones con trazabilidad vigente: lineal y angular. Los patrones utilizados fueron un calibrador de comparadores marca Mitutoyo y un instrumento para la medición angular marca Federal. Por limitaciones de espacio, la figura 3 muestra la calibración lineal y la figura 4 muestra la curva de calibración angular. Tales curvas experimentales permiten refinar la constante de calibración.



Fig. 3 Calibración lineal.

Una vez refinado el valor de la constante de calibración, el instrumento presenta las siguientes características principales dependiendo del modo de operación establecido en el programa para PC (lineal o angular)

- Resolución de $0,1\mu\text{m}$ ó $0,1$ segundos de arco.
- Alcance de $\pm 1000\ \mu\text{m}$ ó ± 1000 segundos de arco.
- Porcentaje de error a escala máxima de $0,01\%$.
- Estabilidad de ± 1 dígito.
- Interfaz amigable y fácil de utilizar

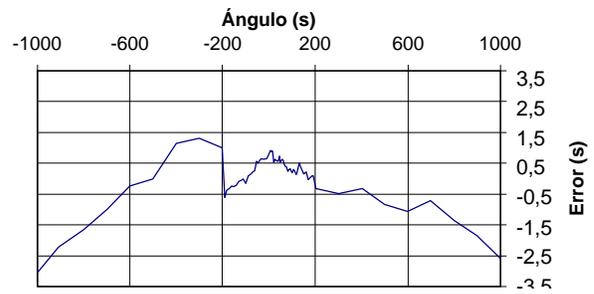


Fig. 4 Curva de calibración angular.

Sin duda alguna un resultado importante es que la implementación del instrumento, con calidad de producto terminado, permite su uso en los servicios que actualmente presta el Laboratorio de Metrología del CI UNAM. De esta manera, dotamos al laboratorio con infraestructura de desarrollo propio, gran calidad y confiabilidad. La figura 5 muestra el instrumento desarrollado y la figura 6 su pantalla de lectura.

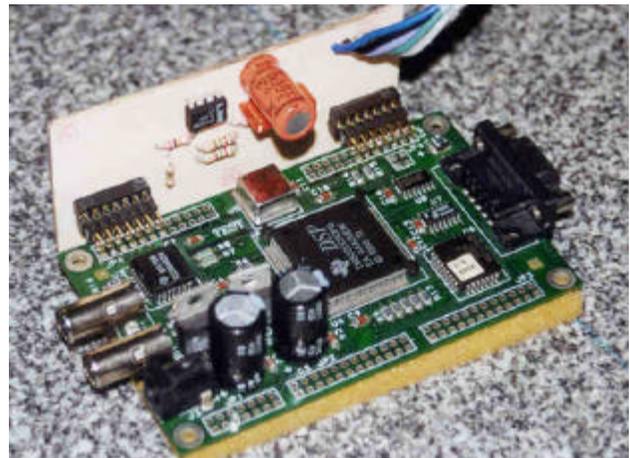


Fig. 5 Instrumento para la medición de desplazamiento y ángulo.

Otro resultado importante es la interpolación lograda mediante el procesamiento en el DSP. No obstante que el número de bits en el AIC (convertidor analógico a digital de la tarjeta DSK) no alcanza teóricamente la resolución establecida ($0,1\mu\text{m}$ ó $0,1$

segundos de arco), el algoritmo de procesamiento en el DSP resuelve en un nivel sub-muestra, permitiendo lecturas estables con tal resolución. Comparando el número de niveles de cuantificación de los convertidores de 14 bits $\pm 2^{13} = \pm 8192$, contra el correspondiente número alcanzado por el algoritmo en el DSP, $\pm 1000/0,1 = \pm 10000$, observamos claramente el trabajo de interpolación sub-muestra. Otra mejora importante con respecto a instrumentos comerciales similares, es la ampliación del alcance de medición, conservando la mínima resolución. Otros instrumentos, tienen diversas escalas para cubrir un alcance de medición amplio, a expensas de incrementar la resolución.

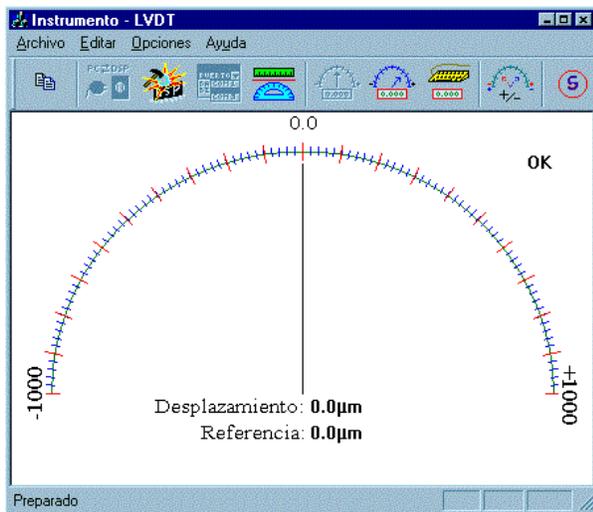


Fig. 6 Pantalla de lectura.

DISCUSIÓN

El algoritmo fue programado en ensamblador debido, principalmente, a que la tarjeta DSK es una herramienta básica de desarrollo. Dentro de las limitaciones de la DSK se encuentra que la memoria disponible es la interna al DSP, por lo tanto, si el algoritmo es programado en un compilador C, la memoria que se necesita para almacenar el programa rebasa las capacidades de la DSK. Otro aspecto, es que la programación en ensamblador permite utilizar el dispositivo al máximo; se pueden aprovechar todas las características del DSP optimizando los tiempos de ejecución y el tamaño del código.

El instrumento no tiene elementos eléctricos o electrónicos de ajuste o calibración como potenciómetros. Los ajustes y la calibración se hacen mediante software, esto tiene la ventaja de

que se puede ajustar la respuesta del transductor en las regiones no lineales con modelos matemáticos no lineales. La arquitectura es muy pequeña y la placa de expansión adicional es más pequeña que la tarjeta DSK. La DSK no fue modificada en ningún aspecto, sólo se le añadieron conectores de expansión.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un instrumento para la medición de desplazamiento y ángulo con alta resolución en todo su intervalo de medición. El instrumento opera con transductores inductivos utilizando un enfoque orientado al procesamiento digital de señales. Se implementó un instrumento confiable que supera el desempeño de los instrumentos analógicos similares en su tipo. Actualmente, el instrumento realiza mediciones seguras debido a su fácil uso, operación en tiempo real e interfase amigable.

REFERENCIAS

- [1] B. Valera, S. Padilla y G. Ruiz, , *Amplificador electrónico para la medición de ángulo administrado por el microcontrolador MC68HC811E2*, SOMIX Congreso de Instrumentación, Xalapa, México, Septiembre de 1995, pp. 303–307,.
- [2] D. Crescini, A. Flammini, D. Marioli and A. Taroni, *Application of an FFT-Based Algorithm to Signal Processing of LVDT Position Sensors*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 47, No. 5, Octubre de 1998, pp. 1119-1123.
- [3] R. M. Ford, R. S. Weissbach y D. R. Loker, *A DSP-based modified Costas Receiver for LVDT Position Sensors*, Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vol. 3, 2000, pp. 1448-1452.
- [4] Texas Instruments, *TMS320C5x User's Guide*, Texas Instruments, 1993, pp. 624.
- [5] Texas Instruments, *TMS320C5x DSP Started Kit. User's Guide*. Texas Instruments, 1994, pp. 140.
- [6] J. G. Proakis y D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing. Principles, algorithms and applications 3rd Edition*, Ed. Prentice Hall, 1996, pp. 968.
- [7] J. Prado y R. Alcantara, *A Fast Square Rooting Algorithm Using Digital Signal Processor*, Proceedings of the IEEE, Vol. 75, 1987, pp. 262-264.