

VISIÓN DE CASO
Clasificación del artículo:
REFLEXIÓN

SISTEMA DE LOCALIZACIÓN ACÚSTICO PARA ROBOTS MÓVILES BASADO EN MÚLTIPLES TRANSMISORES Y UN RECEPTOR

Erwin John Saavedra Mercado*

Resumen

En el presente trabajo se propone una técnica de localización 2D para robots móviles. Dicho mecanismo se basa en la utilización de múltiples transmisores y por lo menos un solo receptor situado en el robot. El ámbito de la aplicación se establece en la necesidad de un bajo costo en robots "desechables" para aplicaciones relacionadas con la detección de minas antipersonales.

Palabras clave
Trilateración, localización, robots móviles y minas antipersonales.

Summary
In the current work a 2D location technique for moving robots. This mechanism is based on the use of manifold transmitters and at least a single receiver located in the robot. The scope of the application is set up due to the necessity of a low cost in "disposable" robots for applications related to the antipersonnel mine detection.

Keywords
Trilateration, location, moving robots, antipersonnel mines.

1. Introducción

Los robots móviles representan un mecanismo adecuado para la detección de minas antipersonales, en comparación con la alternativa humano/perro usualmente utilizada por las fuerzas militares. Los costos involucrados en esta empresa suelen ser altos debido a las pérdidas humanas y animales.

Los intentos para utilizar robots en la detección de minas antipersonales han resultado ser poco satisfactorios. En resumen, esto se debe a los diferentes tipos de minas y a medidas erróneas provenientes de los sensores utilizados. Una solución hipotética no discutida en este artículo propone la realización de un barrido espacial en la zona en cuestión, en la que los esfuerzos de los robots no se concentran solamente en la detección de las minas, sino también en la activación de éstas, de la misma forma en que lo haría una posible víctima. Debido a esto, los robots son de carácter "desechable",

* Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación de las Unidades Tecnológicas de Santander Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: esaavedra@ieee.org.

y evidentemente es necesario reducir sus costos. El presente artículo propone una técnica para la localización de estos basada en una filosofía minimalista y económica.

La propuesta consiste en utilizar sólo un receptor y múltiples transmisores. La disminución de costos se presenta tanto en recursos del procesador, memoria utilizada y velocidad de cálculo, como de etapas de instrumentación adicionales para la adquisición de las señales acústicas. Se puede agregar un sistema de dos receptores para determinar la orientación del robot, pero esto puede ser obviado por medio de odometría o simplemente la corrección de la orientación de un sistema de lazo abierto.

2. Localización

La mayoría de las configuraciones utilizadas [1y 4] realizan la localización del robot móvil por medio de ondas sonoras emitidas por éste. Para realizar la medición, la transmisión de la señal acústica es sincronizada por medio de una señal digital enviada vía RF y posteriormente recibida por un arreglo de múltiples receptores. Debido a que la señal RF viaja a la velocidad de la luz, el tiempo de vuelo (TOF[1]) de la señal acústica que viaja a la velocidad del sonido en el aire[2] puede ser calculado con un margen despreciable de error, con algunas restricciones que se mencionan posteriormente. En el caso de que la unidad móvil sea la que necesite la información de la posición [6], ésta es retransmitida vía RF luego de ser calculada.

Con el propósito de lograr el cometido de una solución minimalista, en la investigación se asume que las unidades no poseen conexión RF y éstas constan sólo de receptores. El sincronizado se realiza por medio de una señal transmitida antes de comenzar el experimento. En resumen, los robots se encuentran sincronizados previamente y por única vez con los transmisores de pulsos acústicos. Los receptores o el receptor es instalado en cada uno de los robots es el encargado de estimar su posición.

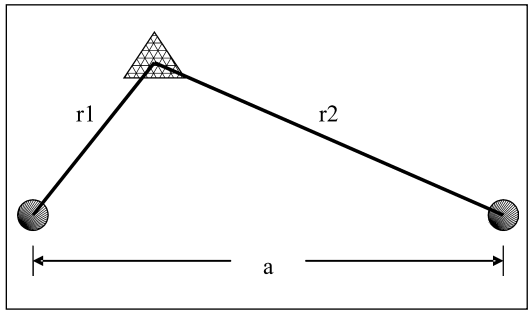
Los métodos utilizados para estimar la posición basada en la recepción de señales acústicas utilizan dos mecanismos. El primero consiste en estimar el ángulo de procedencia de la señal acústica [1], además del sincronizado para establecer la distancia. Este método hace uso de por lo menos dos receptores en la unidad móvil. El segundo sistema –siempre y cuando no sea necesario conocer la orientación del robot sino sólo su posición– hace uso de solo un receptor. Esto se logra determinando el TOA de cada uno de los transmisores. Para esto cada transmisor se configura con una frecuencia específica. El robot móvil implementa entonces un banco de filtros y aisla cada una de las señales y calcula el TOA individual para cada transmisor. Aunque la primera solución es análoga a la forma utilizada por los animales para la localización, se utiliza la segunda por presentar ahorros en el material utilizado.

En la figura 1 se observa un esquema basado en dos transmisores y un solo receptor. Sincronizando la base de tiempo del robot móvil con la base de tiempo utilizada por los transmisores es posible estimar r1 y r2 por medio del cálculo del TOA. Se utilizan sólo dos transmisores, con el propósito de disminuir la carga de cálculo del procesador del robot móvil. Esta configuración determina la posición en 2D siempre y cuando los robots se encuentren sólo sobre alguno de los planos determinados por la línea recta que une ambos transmisores (ver figura 3).

1 Time of Flight (Tiempo de vuelo). También se utiliza Time of Arrival (TOA) en español tiempo de llegada.-

2 La velocidad del sonido en el aire es usualmente del orden de 320ms^{-1} a 27ºC

Figura 1. Transmisores y el robot móvil receptor



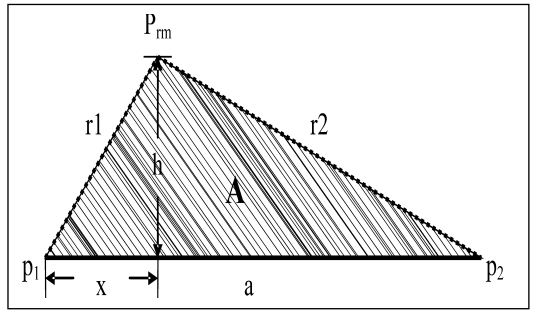
La frecuencia utilizada por cada uno de los transmisores debe de ser lo más alta posible para lograr la mejor resolución en la determinación de la posición. La limitante en la práctica obviamente es la frecuencia más alta que puede ser detectada sin atenuación considerable por los micrófonos utilizados por los robots. En el caso de la simulación se eligieron tentativamente las frecuencias de 8kHz y 8.6kHz. Finalmente, los transmisores deben ser configurados para transmitir simultáneamente una señal acústica en las frecuencias determinadas en un periodo de algunos segundos. El tiempo de este periodo lo determina tanto la distancia máxima que pueden adquirir como también la cantidad de sobrecarga que se desee imponer sobre los procesadores de los robots. Debido a lo relativamente costoso de la estimación de la posición, es deseable disminuir la frecuencia con la que se realiza esto; sin embargo, esto conlleva a un mayor error. Implementar un sistema inercial de navegación a los robots resulta ser útil, pero en general es opcional. En el caso de la simulación se decidió transmitir las señales por una duración de 100 ms cada 5s.

Los métodos usuales proponen la intersección de los círculos de distintos radios producidos por cada transmisor. Para evitar la matemática asociada a resolver un sistema de ecuaciones cuadráticas (1), el presente enfoque utiliza algunas suposiciones, tales como las áreas en las que se encuentran localizados los robots.

$$x_1^{\,2} + h^2 = r_1^{\,2}$$
$$x_2^{\,2} + h^2 = r_2^{\,2} \qquad (1)$$

La estimación de la posición se realiza por medio del cálculo del área de triangulo formado por $r_{1,}$ r_2 y siendo éstas las distancias estimadas por los TOA de los dos transmisores y la distancia entre los dos transmisores respectivamente.

Figura 2. Área del triangulo formado por los dos transmisores y el receptor



De la figura 2 se tiene que se puede calcular el valor *h* por medio de (2), y el valor de *x* por medio de (3).

$$h = \frac{2A}{a} \qquad (2)$$

$$x = \sqrt{r_1^{\,2} - h^2} \qquad (3)$$

El valor de A se puede estimar utilizando la formula de Heron (4), ya que se tienen los valores de cada uno de los tres segmentos del triangulo.

$$A = \sqrt{s(s - r_1)(s - r_2)(s - a)} \qquad (4)$$

donde

$$s = \frac{a+b+c}{2} = \frac{P}{2} \qquad (5)$$

Además, la altura se puede calcular de (6), que combinada con (3) permite la obtención de la localización del receptor en cuestión.

$$h = \frac{2}{a}\sqrt{s(s-r_1)(s-r_2)(s-a)} \qquad (6)$$

El valor de x se calcula de (3) utilizando métodos iterativos. Se determinó empíricamente que el método es exacto para 4 cifras decimales en un rango de 0 a 2^{16}-1 en 17 iteraciones. Si se asume que el robot no va a superar una determinada distancia, es posible establecer la cantidad de iteraciones mínimas necesarias para encontrar el valor de la raíz cuadrada. Nótese que a es una constante para el problema.

$$x_{k+1} = x_k + \frac{x_k}{2}\left(1 - a x_k^2\right) \qquad (7)$$

$$\sqrt{x} = x_k d \qquad (8)$$

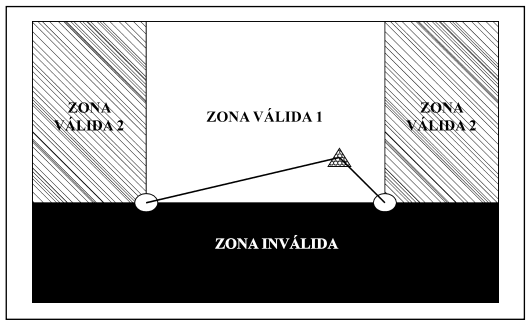
donde $x_0 = \frac{1}{d}$.

Obsérvese también que esto es válido para el rectángulo creado por medio de h y x. Para los casos en el que el robot móvil se encuentre localizado en $x < 0$ y/o $x < a$, el algoritmo de cálculo deberá determinar esta situación basado en la magnitud de r_1 y r_2 (ver figura 3).

3. La detección de las señales acústicas

La detección de las señales acústicas es implementada utilizando filtros FIR y pasa bandas de fase lineal generalizada. Se requiere que sus fases sean lineales debido a la necesidad de evitar errores en la estimación de la posición que son causados por retardos en el tiempo de respuesta y son asociados a la no linealidad de su fase. En realidad un filtro IIR de fase no lineal puede ser utilizado siempre y cuando se conozca el valor de la fase en la banda de paso del filtro. En resumen, se desea conocer con precisión el tiempo de propagación del filtro para adaptarlo a la ecuación de tiempos. Con el conocimiento del retardo de grupo, la distancia del transmisor al receptor se puede determinar por medio de (9) y (10).

Figura 3. Esquema de zonas del sistema



$$t_{p_1} = tof_1 - t_{filtro} - t_{e} \qquad (9)$$

$$d_{p_1} = v_{s} t_{p_1} \qquad (10)$$

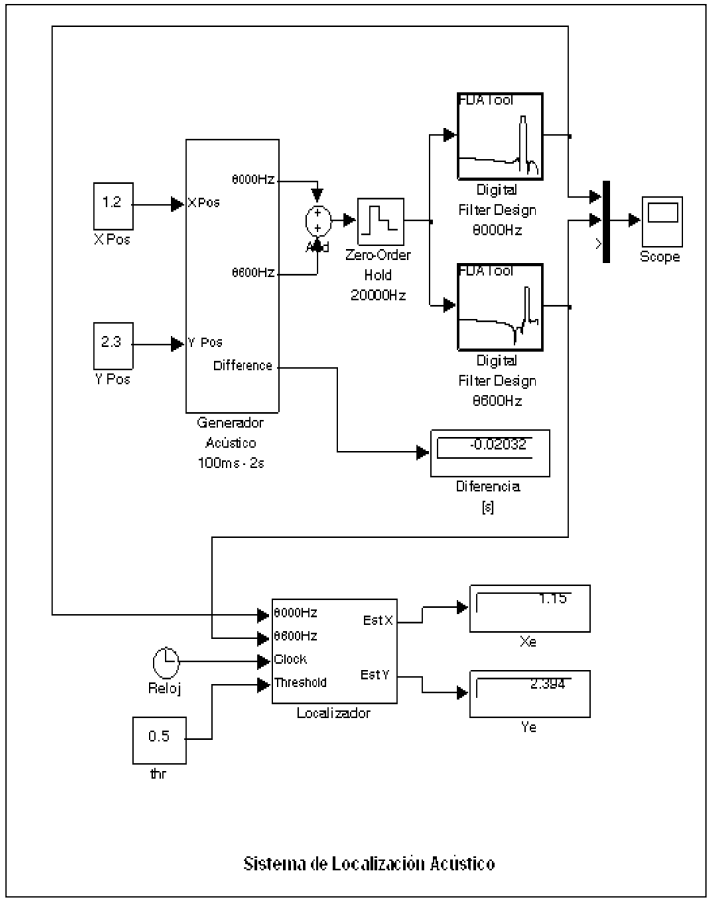
de donde v_{s} es la velocidad del sonido en el aire y ésta es de aproximadamente $320 m^{-1}$. t_{filtro} y representa el retardo de grupo del filtro, o en otras palabras, el tiempo que la señal de entrada demora en ser propagada a través de éste. Además, se debe de tener en cuenta la relación señal ruido que en este caso genera secciones de mayor rango de incertidumbre que otras.

4. Simulación

Con el propósito de probar el sistema propuesto antes de implementarlo se si-

mularon algunas de las características de la solución propuesta. En la figura 4 se observa el modelo general en *Simulink* y se identifica el generador de señales que recibe como argumento la posición real y procede a generar las señales recibidas por el receptor del robot móvil. Posteriormente, las señales son filtradas por medio de dos filtros FIR de orden 512 y fase lineal generalizada encargados de separar las diferentes frecuencias; además, los filtros no poseen ninguna característica especial. El retardo de grupo constante es una característica deseada para mejorar el determinismo del sistema. De aquí que la fase, una relativa selectividad y un orden moderado son las principales características deseadas para estos filtros. Finalmente, se calcula la posición estimada utilizando las formulas vistas anteriormente.

Figura 4. Modelo en Simulink del sistema de localización acústico

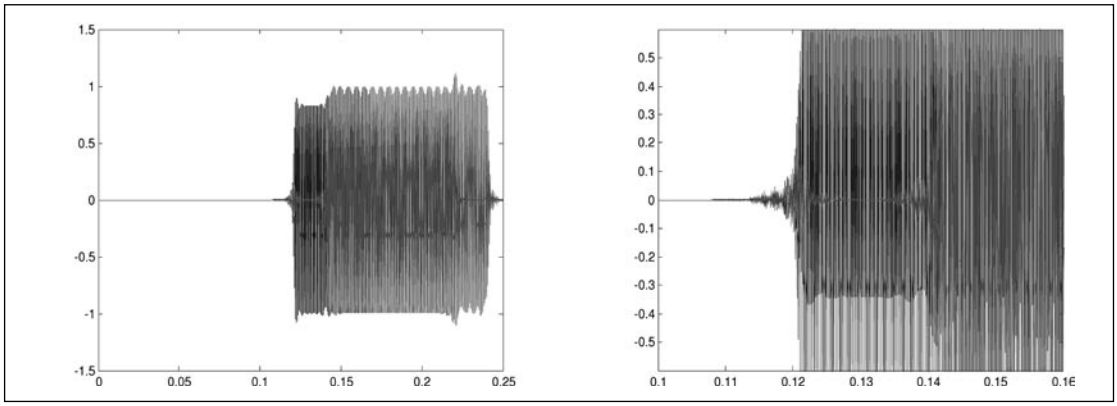


La frecuencia de muestreo del sistema fue de 20kHz. El *setpoint* utilizado para determinar la detección de una señal de entrada fue de 0.5 (para la magnitud de 1 de las señales). En el ejemplo de la figura se observa la estimación de (1.2, 2.3) como (1.15, 2.394). Para este caso, el máximo error estimado fue de 9 cm. Este valor varía en general en aproximadamente $\pm$10 cm. Sin embargo, existen regiones en las cuales los valores poseen un mayor error debido la magnitud del error del sistema en comparación con la magnitud de la medida (hecho que se puede considerar como ruido).

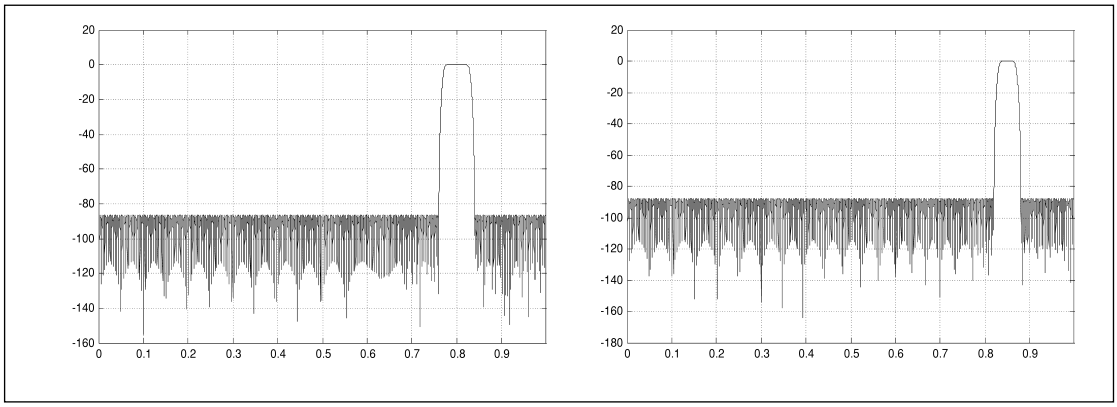
En este modelo el bloque *generador acústico* se encarga de producir dos tonos de 8kHz y 8.6kHz desfasados en la magnitud adecuada para recrear el efecto del desplazamiento del receptor (el robot). Para calcular esta magnitud se hace uso de la posición del robot, en el ejemplo (1.2 m, 2.3) y las posiciones de los transmisores, en el ejemplo en (0 m, 0 m) y (10 m, 0m). Además, éste reproduce las señales acústicas por una duración de 100 ms, periódicamente cada 2s. El desfase en tiempo de estas señales es visualizado y equivale en tiempo a -0.02032s, hecho que se aprecia en la gráfica 1.

Los aspectos pendientes por incorporar en el modelo son; la generación de ruido acústico externo (blanco inicialmente) y la incorporación de una rutina encargada de verificar si recibió una señal de duración válida. Se debe de incluir también un modelo de atenuación de las señales transmitidas según la distancia recorrida y la posible existencia de obstáculos.

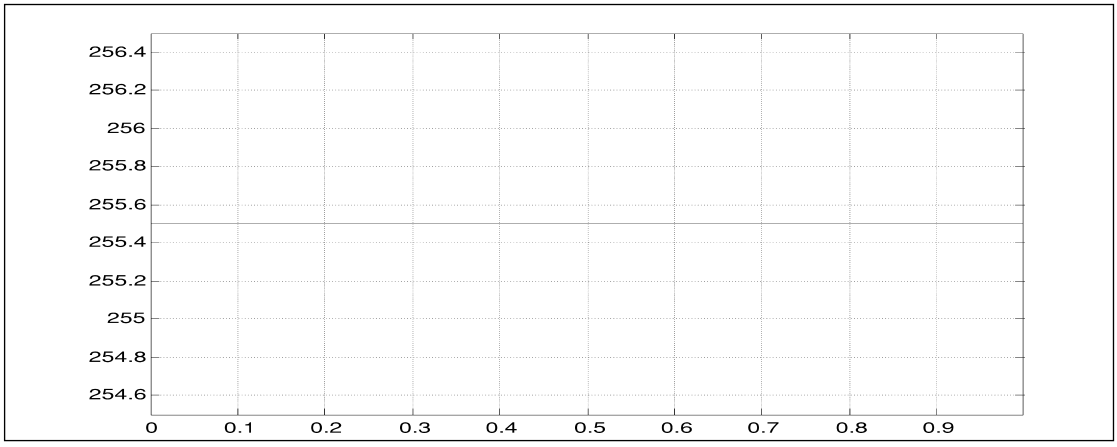
Gráfica 1. Señales desfasadas debido a la posición del receptor en relación al transmisor



Gráfica 2. Filtros FIR pasabanda de fase generalizada y orden 511



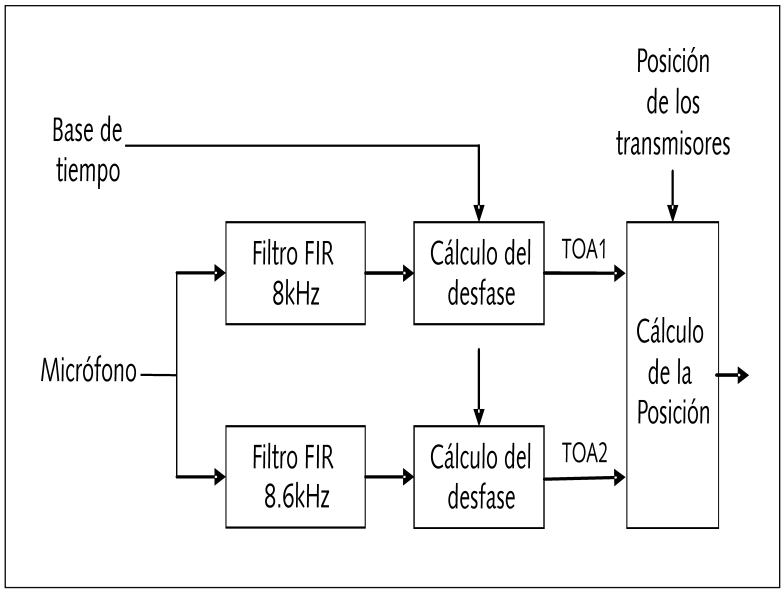
Gráfica 3. Retardo de grupo para ambos filtros pasabandas



5. Resultados Preliminares

Hasta el momento se implementó el algoritmo para la detección de la distancia utilizando un procesador digital de señales, en este caso el DSP56858 de Freescale Semiconductors. Se implementaron los mismos filtros FIR sugeridos en la simulación, pero inicialmente a una frecuencia menor: 1kHz, y 1.25kHz, esto con el propósito de utilizar micrófonos electret. Además los coeficientes son calculados con una resolución de $\frac{1}{2^5}$, resultado de utilizar registros de 16 bits en formato Q con signo (nótese que el valor absoluto de todos los coeficientes de los filtros fueron menores que 1). El rango útil de detección del sistema probado garantizó máximo silencio de 4 m. Procedimientos para mejorar el rango de captura se encuentran en ejecución. Un diagrama de flujo del sistema implementado para pruebas se observa en el diagrama 1. El sistema fue implementado utilizando un sólo DSP (corriendo a 60MIPS). Este mismo funciona como transmisor y receptor, para obviar la sincronización de los eventos de transmisión acústica y captura. Los datos registrados del TOA son transmitidos a una PC vía puerto SCI a 38400 bps.

Diagrama 1. Diagrama de bloques del sistema de detección



Listado 1. Estructura principal para la detección de un solo canal

```
k=0;
while(1)
{
        // transmit
        timer=0;
        flag=0;
        while(timer<5000);
        timer=0;
        xs[0] = 0x2000;    //     0.25
        xs[1] = 0x2000;    //     0.25
        flag=1;
        indLoad(0x003F);

        //      capture
        while(sample > -THRESHOLD ||
        sample < THRESHOLD);

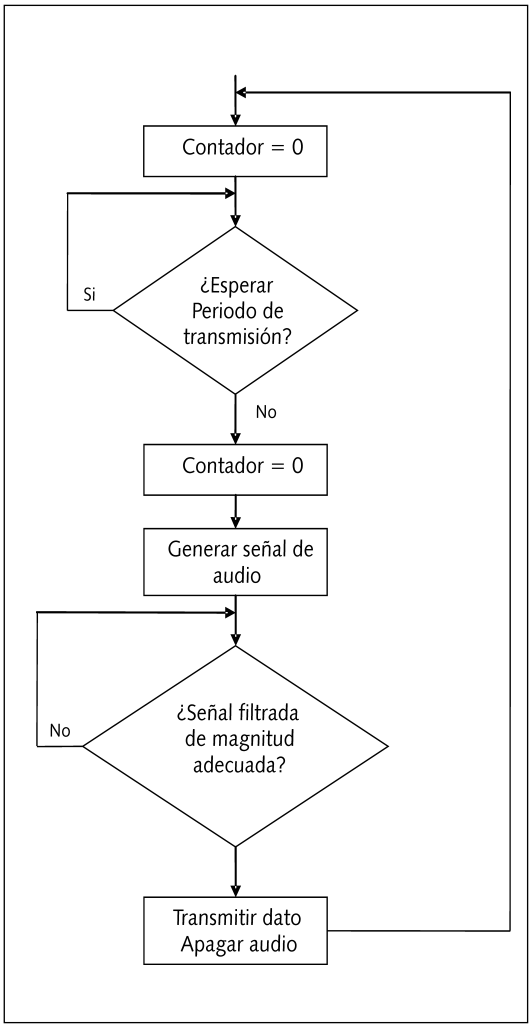
        i=(int)timer;
        flag=0;
        indLoad(0x0000);

        //upload
        sci0Send(getH(i));
        sci0Send(getL(i));

        //delay
        timer=0;
        while(timer<2000);
}
```

En el listado 1 se observa la estructura de detección utilizada para la adquisición del TOA en un solo canal. El diagrama 1 mues-

Diagrama 2. Diagrama de flujo del sistema de pruebas implementado en el DSP56858



tra el proceso. Sin embargo, en el listado no se muestra el código de la rutina de interrupción en la que se implementa el filtro. Gracias a esta última, la variable *sample* representa la salida del filtro de 1kHz. Esta rutina sólo transmite el TOA y el cálculo total es realizado en la PC. Para completar el programa en totalidad es necesario implementar el algoritmo de cálculo de (9), según las ecuaciones vistas anteriormente. Es necesario aclarar que se evitó el uso de la PC debido a retardos no determinados de la tarjeta de sonido [6].

Los resultados obtenidos se encuentran relacionados en la tabla 1. No obstante, por el momento sólo se muestra el valor del contador para las distancias del micrófono relacionadas. La frecuencia de muestreo utilizada fue de 20kHz.

Tabla 1. Resultados preliminares del prototipo para un solo canal

Distancia	Valor promedio de la variable del contador
5cm	298 (255 + 3.125)
50cm	327 (255 + 31.25)
2 m	438 (255 + 125)

Tabla 1. Resultados preliminares del prototipo para un solo canal

Los resultados preliminares muestran los efectos del filtro FIR utilizado, además de un retardo adicional que se le atribuye a los filtros *anti-aliasing* incluidos en la etapa de audio de la tarjeta de procesamiento digital de señales. El evento completo de la detección de los dos canales falta por implementarse para poder ejecutar el sistema de localización completo.

6. Conclusiones

La utilización de sistemas de localización de robots de bajo costo basados en múltiples transmisores y un solo receptor en teoría es una alternativa viable. El prototipo experimental construido para pruebas preliminares funcionó apropiadamente. Aunque la idea es reducir este sistema a un microcontrolador de bajo costo, las pruebas fueron

realizadas con el DSP por comodidad. Sin embargo, este es un avance del proyecto en su totalidad. Debe quedar claro que la implementación en un microcontrolador (fuera de la resolución seleccionada) no representa ningún problema distinto al de aumentar el periodo de transmisión de la señal de localización.

Las pruebas preliminares arrojaron una distancia satisfactoria de localización de aproximadamente 3m en un ambiente de relativa cantidad de obstáculos. Se considera que ésta puede ser mejorada por lo menos a un rango de 10m, permitiendo que el sistema brinde mejores beneficios en lo que concierne al área de cobertura. También se observó en las simulaciones que en las posiciones para los cuales el valor de ésta es cercano al valor empírico del error estimado (aproximadamente 20 cm), la estimación posee un error mayor a los 40 cm. En otras palabras, el robot móvil deberá procurar localizarse en posiciones para las cuales los valores estimados de su posición sean mayores de 40 cm, para lograr un error en la estimación de aproximadamente 10 cm.

Como puntos adicionales a probar encontramos la implementación de los filtros a través de sistema IIR, como también la incorporación del efecto de obstáculos en el área de exploración del robot.

Referencias bibliográficas

[1] J. Murray, H. Erwin, S. Wermter. "Robotic Sound-Source Localization and Tracking Using Interaural Time Difference and Cross-Correlation".

[2] P. Aarabi, Q. H. Wang, M. Yeganegi. "Integrated Displacement Tracking and Sound Localization".

[3] T. Federico, R. Lluís. (Feb. 2005). "Revisiting Trilateration for Robot Localization". *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 1, pp. 93-101.

[4] Navarro-Serment, Paredis Christtiaan, Khosla Pradeep. "A Beacon for the Localization of Distributed Robotic Teams".

[5] J. Leonard, H. Durrant-Whyte. (Jun. 1991). "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 376-382.

[6] Mandal, Lopes, Givargis, Haghighat, y Jurdak, Baldi. (2004). "Beep: 3D Indoor Positioning Using Audible Sound". IEEE.

[7] Oppenheim, A.V. (2000). *Tratamiento de señales en tiempo discreto.* S.d.: 2da Edición, Prentice Hall.