

ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE NODO DE MEDICIÓN DE ÁNGULO PARA REDES DE SENSORES

F. Martín Pirchio[†], P. Mandolesi^{†*}, P. Julián^{†‡}, F. Masson[†]

[†]*Dep. de Ing. Eléctrica y Computadoras, Universidad Nacional del Sur, BA, Argentina.*

[‡]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Cap. Fed, Argentina.*

^{*}*CIC Comisin de INvestigaciones Cientificas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina
e-mail: fmartinpirchio@gmail.com*

Resumen: En este trabajo se presenta un análisis estadístico de factores que afectan al desempeño de un nodo de bajo consumo para redes de sensores para la medición del ángulo desde el cual proviene una señal sonora. Se utiliza un diseño factorial para analizar el efecto del tipo de procesamiento que se realiza sobre las señales medidas de forma de disminuir la varianza del estimado de ángulo. Este análisis se realizó con datos experimentales tomados con un prototipo del sensor propuesto.

Palabras Claves: Redes de Sensores, Sensor Acústico.

1. INTRODUCCION

La disponibilidad de una sistema microelectromecánico en miniatura (MEMS por sus siglas en inglés) basado en micrófonos, permite la realización de nodos para la tarea de detección, localización y seguimiento de objetivos (Li et al., 2003). En particular si los sensores son de bajo consumo y están adosados a una interfaz de RF que comunica los datos en una red, se puede organizar una estructura que se denomina una Red de Sensores. Este tipo de sistemas tiene como característica saliente la baja capacidad de cálculo de un procesador (si existe), la baja capacidad de transmisión de datos por aire y fundamentalmente la restricción de potencia que está directamente relacionada con la supervivencia de los nodos en la red. Por esto es crucial el diseño del sensor y el análisis de sus límites de comportamiento así como la cantidad de procesamiento necesario. Todo impactará en definitiva en su consumo y por lo tanto su vida útil en la red (Rabaey et al., 2002).

En este trabajo se presenta un análisis de factores que afectan al desempeño de un nodo de bajo consumo para redes de sensores para la medición del ángulo

desde el cual proviene una señal sonora (Julián et al., 2005). Se pretende analizar sobre datos experimentales algoritmos de cálculo alternativos a los utilizados en la implementación original del sensor y realizar filtrados de la señal que permitan disminuir la varianza en la estimación del retardo.

El trabajo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta el planteo de las experiencias realizadas, en la sección 3 el diseño estadístico de las experiencias y en la sección 4 las conclusiones.

2. PLANTEO DE LA EXPERIENCIA

El sensor acústico mide el ángulo del cual proviene un sonido emitido por una fuente sonora de interés. El ángulo se obtiene a partir del procesamiento de cuatro micrófonos MEMS ubicados en una estructura acústica como muestra la figura 1. Luego, con las cuatro señales se implementa un algoritmo de cros-correlación derivativa (Julian et al., 2005). Esta es una variante de la cros-correlación entre dos señales temporales y ha sido demostrado que algunos animales utilizan este algoritmo para obtener información de azimut.

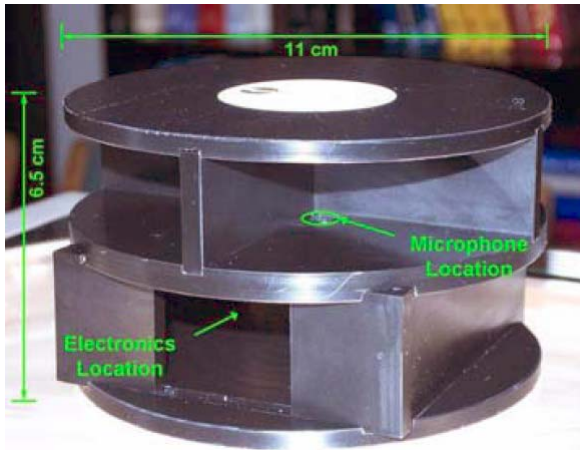


Fig. 1: Sensor de ángulo analizado

En el análisis que sigue se restringen los ángulos de análisis al sector 0°-180° dado que el sensor es simétrico. En el rango que va desde 0° a 180° se tomaron 19 muestras equi-espaciadas cada 10°, obteniéndose así, 19 muestras de señales de audio. Cada muestra tiene cuatro canales correspondientes a cada uno de los micrófonos del sensor; a su vez, para cada canal se adquirieron 30 segundos de audio con una resolución de 12 bits y una frecuencia de muestreo de 10KHz. En la figura 2 se muestra el esquema del ensayo realizado.

Por cada señal se considera el par de canales 2-3 y se calcula el retardo para bloques de señal de 650 ms obteniéndose así, un total de 40 valores de retardo. Con estos valores se calcula el promedio y su correspondiente desvío estándar (STD).

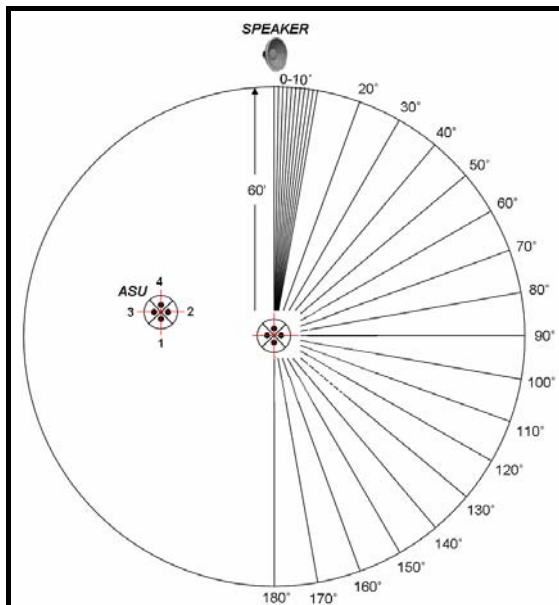


Fig. 2. Esquema del ensayo experimental

Dado que se cuenta con las señales analógicas que estaban entrando a la ASU, se pretende disminuir el STD del retardo estimado mediante post-procesamiento filtrando las señales originales en el rango de 100 a 300 Hz.

Se plantea la utilización de tres tipos de filtros:

- PASA BAJOS 300 Hz
- PASA BANDA 100-300 Hz
- PASA ALTOS 100 Hz

Las modificaciones sobre el algoritmo original radican en una diferencia en la selección del valor del retardo. Con el algoritmo original no tiene la seguridad de detectar el primer registro donde se produce cruce por cero de la función derivada de correlación. Esta es una diferencia menor, pero pueden ser un motivo del aumento de la varianza.

Antes de la experimentación se hizo un análisis espectral de señales donde se aprecia que la mayor concentración de potencia espectral de ruido se encuentra en la banda de baja frecuencia para nuestro espectro de interés. Por ello se descarta la utilización del filtro pasa bajos, ya que este no modificará el contenido espectral del ruido de manera significativa.

3. PLANTEO DEL PROBLEMA ESTADISTICO

Para analizar la influencia del filtrado y algoritmo de estimación sobre el desvío estándar del retardo, se proponen dos tipos de filtros, dos órdenes distintos y dos versiones del algoritmo. Con estos se calcularán 40 retardos sobre el mismo par de canales para cada una de las diferentes señales, obteniéndose una media y un desvío estándar por cada ángulo del ensayo. El valor de los retardos está expresado en 'taps', que son unidades digitales dependientes de la frecuencia de reloj del sistema.

Dadas las combinaciones de factores a estudiar, obtenemos que el ensayo se puede describir mediante un experimento factorial 2^3 (Box, et al., 1978) Este planteo nos permitirá analizar interacciones entre los factores y determinar cuales son los de mayor influencia sobre el desempeño.

3.1 Cálculo del retardo

La cantidad de muestras por ángulo del ensayo es:

$$n = 40 \Rightarrow v = n - 1 \Rightarrow v = 39 \quad (1)$$

Con el promedio de cada valor de media tendrá un STD (estimado de σ) de :

$$STD\% = \frac{100}{\sqrt{2v}} \quad (2)$$

$$STD\% = \frac{100}{\sqrt{2v}} = \frac{100}{\sqrt{2 \cdot 39}} = 11.32\% \quad (3)$$

3.2 Aplicación del método factorial

Se realiza un muestreo aleatorio sobre el conjunto de muestras, tomando 8 señales para hacer el filtrado y posterior cálculo del retardo. Las muestras a utilizar

son las correspondientes a los ángulos: 30° 40° 70° 80° 110° 140° 150° 170°.

En la tabla 1 se muestran los factores y sus combinaciones aplicadas sobre las muestras. El tipo de filtro se codifica con '+' para el filtro pasa altos y con '-' el pasa banda; para filtros de segundo orden se utiliza '+' y para orden cuarto, '-'; por último, el algoritmo número 1 se codifica con '+' y con '-' el algoritmo número 2. Con la letra 'Y' se denota el número de muestra con el cuál se realizarán los cálculos estadísticos.

Tabla 1 Codificación de los factores

Y	Muestra	Filtro	Orden	Algoritmo
1	30°	+	+	+
2	40°	-	+	+
3	70°	+	-	+
4	80°	-	-	+
5	110°	+	+	-
6	140°	-	+	-
7	150°	+	-	-
8	170°	-	-	-

Realizando el procesamiento de las señales con los correspondientes filtros, se calculó las medias y varianzas, que se presentan resumidas en la tabla 2.

Tabla 2 Cálculo de retardos y varianzas

Y	Retardo	Varianza	STD
1	47.950	1.485	1.218
2	53.550	0.767	0.876
3	71.375	1.317	1.148
4	71.775	1.205	1.098
5	68.275	1.384	1.176
6	45.525	2.974	1.724
7	36.075	17.661	4.203
8	16.925	2.635	1.623

Como resultado de cada experimento tomamos el valor del desvío estándar y calculamos los efectos principales y efectos secundarios de las variables. Efectos principales:

$$FILTRO = \frac{Y_2 + Y_4 + Y_6 + Y_8}{4} - \frac{Y_1 + Y_3 + Y_5 + Y_7}{4} \quad (4)$$

$$ORDEN = \frac{Y_3 + Y_4 + Y_7 + Y_8}{4} - \frac{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_6}{4} \quad (5)$$

$$ALGORITMO = \frac{Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8}{4} - \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \quad (6)$$

Efectos secundarios:

$$FILTRO \times ORDEN = \frac{Y_1 + Y_3 + Y_6 + Y_8}{4} - \frac{Y_2 + Y_4 + Y_5 + Y_7}{4} \quad (7)$$

$$FILTRO \times ALGORITMO = \frac{Y_1 + Y_4 + Y_5 + Y_8}{4} - \frac{Y_2 + Y_3 + Y_6 + Y_7}{4} \quad (8)$$

$$ALGORITMO \times ORDEN = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_7 + Y_8}{4} - \frac{Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6}{4} \quad (9)$$

Estos resultados se resumen en la tabla 3 y se presentan en la figura 3

Tabla 3 Efectos principales y secundarios

Efecto	STD
FILTRO	-0.6061
ORDEN	0.7690
ALGORITMO	10.969
FILTRO x ORDEN	-0.7086
FILTRO x ALGORITMO	-0.4095
ALGORITMO x ORDEN	0.6934

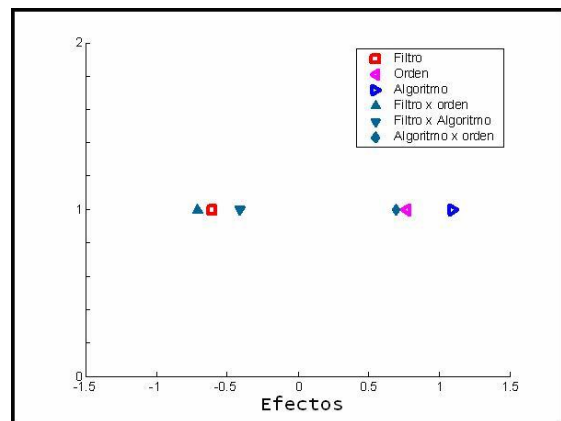


Fig. 3. Efectos principales y secundarios

Del cálculo de los efectos se puede interpretar que existe una importante interacción entre las variables por lo que cualquier factor principal no puede ser interpretado directamente (ningún efecto aparece aislado).

Para analizar estas interacciones, se debe estudiar los cambios producto de los factores relacionados, considerando el promedio de los efectos producto del tercer factor. Por ejemplo si tomamos la interacción entre filtro y orden, tomaríamos el promedio de las acciones producidas por el factor algoritmo.

En la tabla 4 se muestran los valores correspondientes al análisis de interacción entre los factores filtro y orden.

Tabla 4 Interacción entre filtro y orden

Muestra	Filtro	Orden	Algoritmo	STD promedio
30° / 110°	+	+	+ -	1.1974
40° / 140°	-	+	+ -	1.3000
70° / 150°	+	-	+ -	2.6751
80° / 170°	-	-	+ -	1.3604

En la figura 4 se presentan las diferencias producto de

los factores orden y filtro. Como puede verse, existe una leve diferencia entre cambiar el orden del filtro y la combinación orden '+', filtro '+' es la de menor dispersión; tal combinación es un filtro pasa alto de orden 2. Parecería entonces, que se obtiene una menor dispersión con el filtro más sencillo. Para tener una mayor certeza sobre esta aseveración, se considerará otro conjunto de muestras.

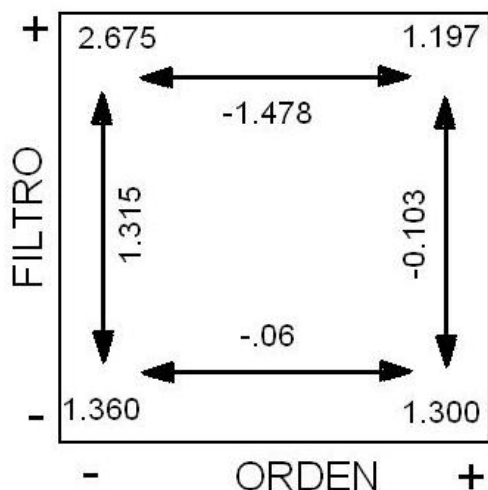


Fig. 4 Interacción Filtro-Orden

Tomando aleatoriamente otro conjunto de muestras para analizar muestras, y recalculando los retardos y varianza, obtenemos los valores presentados en la tabla 5.

Tabla 5 Cálculo de retardos y varianzas

Y	Muestra	Retardo	Varianza	STD
1	30°	47.950	1.4846	1.218
2	40°	53.550	0.7667	0.875
3	70°	71.375	1.3173	1.147
4	80°	71.775	1.2045	1.097
5	10°	26.100	2.8103	1.676
6	60°	71.750	1.2692	1.126
7	110°	67.400	0.9641	0.981
8	120°	63.125	2.9840	1.727

Utilizando las ecuaciones (4) a (9) calculamos los efectos de los distintos factores. Los resultados se muestran en la tabla 6 y en la figura 5.

Tabla 6 Efectos principales y secundarios

Efecto	STD
FILTRO	-0.0493
ORDEN	0.0144
ALGORITMO	0.2933
FILTRO x ORDEN	0.3970
FILTRO x ALGORITMO	0.1472
ALGORITMO x ORDEN	-0.0612

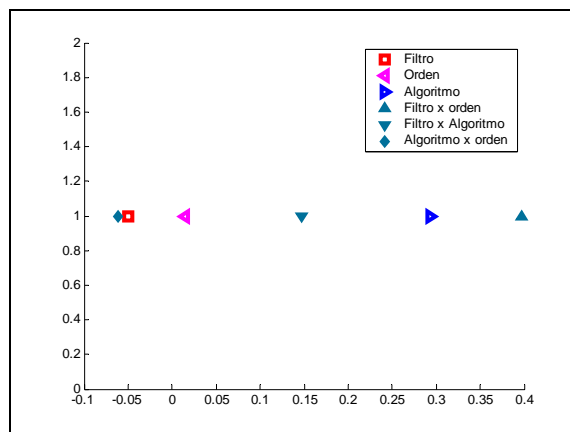


Fig. 5 Efectos principales y secundarios

Como puede verse en la figura 6, el efecto principal del algoritmo no puede ser considerado individualmente ya que su interacción con el tipo de filtro es por lo menos 1/2 de su valor.

La presencia del efecto conjunto del tipo de filtro y el orden es la más importante, por lo que recalculamos la interacción entre estos factores. Los valores de este cálculo son presentados en la tabla 7 y esquematizados en el figura 7

Tabla 7 Interacción entre filtro y orden

Muestr a	Filtro	Orden	Algoritmo	STD promedio
30° / 10°	+	+	+-	1.4474
40° / 60°	-	+	+-	1.0011
70° / 110°	+	-	+-	1.0648
80° / 120°	-	-	+-	1.4125

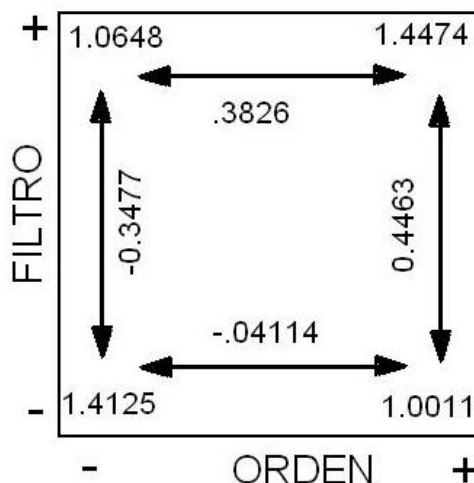


Fig. 5. Interacción Filtro-Orden

Los efectos combinados de filtro-orden que menor desvío estándar tienen son la implementación de un filtro pasa banda de orden 2 y la realización de un filtro pasa altos de orden 4.

De los dos conjuntos de datos analizados podemos

deducir que hay dos posibles soluciones de filtrado para analizar con más detalle. Estos son un filtro pasa banda de orden 2 y un filtro pasa altos de orden 4. Debido a la interacción orden-algoritmo, no se pudo concluir que la modificación que introduce el nuevo algoritmo sea muy importante; por ello se optó por mantener el algoritmo original.

3.3 Comparación entre posibles implementaciones

Con los filtros propuestos en 3.2, se procesan nuevamente las muestras de señal para un mayor rango angular. En particular se toman 13 muestras que abarcan el rango de 0° a 120°. Los retardos se calculan utilizando el algoritmo N°1. Se comparan las varianzas con las provenientes de las señales sin filtrar. También se comparan las varianzas de los dos experimentos entre sí. Los datos a analizar se presentan en la tabla 7.

Tabla 7 Interacción entre filtro y orden

Muestra	Y	Sin filtrar	Pasa Banda 2°	Pasa Altos 4°
		STD	STD	STD
0°	1	18.448	10.513	10.328
10°	2	76.642	14.480	11.544
20°	3	20.057	11.297	13.202
30°	4	28.007	10.473	10.619
40°	5	22.203	0.8756	0.9213
50°	6	30.181	14.884	11.320
60°	7	15.253	10.124	0.9055
70°	8	23.647	10.178	11.477
80°	9	25.795	12.504	10.739
90°	10	23.302	13.337	11.323
100°	11	37.338	12.558	11.959
110°	12	15.960	11.266	11.433
120°	13	1.586	15.852	16.013
Promedio		27.131	12.017	11.402
Varianza (s ²)		2.6140	0.0455	0.0311

Dado a que se tiene igual cantidad de muestras para todas las experiencias (n=13), los valores de la distribución F para $v_1 = v_2 = v_3 = 12$ son los mismos. Tales valores son:

$$\begin{aligned}
 F_{v_1 v_2} (25\%) &= 1.49 \\
 F_{v_1 v_2} (10\%) &= 2.15 \\
 F_{v_1 v_2} (5\%) &= 2.69 \quad (10) \\
 F_{v_1 v_2} (1\%) &= 4.16 \\
 F_{v_1 v_2} (0.1\%) &= 7.0
 \end{aligned}$$

donde v son los grados de libertad de la función F .

Primero se compara si la varianza del filtrado 1 es la misma que la del sistema sin filtro. La Hipótesis de nulidad se plantea como (por brevedad de notación se

suprime el cuadrado de la varianza, $\sigma_1^2 = \sigma_1$):

$$\begin{array}{cc}
 \text{I} & \text{II} \\
 \sigma_1 = \sigma_2 & \text{or} \quad \sigma_1 > \sigma_2 \quad (11)
 \end{array}$$

Relacionando la varianza con su estimado, obtenemos

$$\frac{S_1}{S_2} \square \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \cdot F_{v_1 v_2} \Rightarrow \frac{S_1}{S_2} = 57.45 \quad (12)$$

Comparando este valor con los de la distribución F , la hipótesis de nulidad es desacreditada; por lo que las medidas sin filtrar tienen una varianza mayor, o equivalentemente, el filtrado introduce una disminución en la varianza de los retardos medidos.

En el segundo caso se supone que la varianza del filtrado 2 es igual a la del sistema sin filtrar.

Relacionando la varianza con su estimado, obtenemos

$$\frac{S_1}{S_3} \square \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \cdot F_{v_1 v_3} \Rightarrow \frac{S_1}{S_3} = 83.96 \quad (13)$$

Nuevamente, la hipótesis de nulidad queda desacreditada y podemos decir que el filtrado introduce una disminución en la varianza de los retardos medidos.

Como tercera comparación, suponemos que:

$$\begin{array}{cc}
 \text{I} & \text{II} \\
 \sigma_2 = \sigma_3 & \text{or} \quad \sigma_2 > \sigma_3 \quad (14) \\
 \frac{S_2}{S_3} \square \frac{\sigma_2}{\sigma_3} \cdot F_{v_2 v_3} & \Rightarrow \quad \frac{S_2}{S_3} = 1.46 \quad (15)
 \end{array}$$

En este caso la hipótesis no puede ser desacreditada con total seguridad por lo podemos suponer que ambos filtrados introducen la misma varianza en la estimación.

Ahora, si consideramos un intervalo de confianza de 98%, tenemos que:

$$L_{menor} = \frac{S_2^2 / S_3^2}{B} \quad L_{mayor} = \frac{S_2^2 / S_3^2}{A} \quad (16)$$

Donde $A = 1 - \frac{1}{2}\alpha$, $B = \frac{1}{2}\alpha$ son puntos de la función de probabilidad F con grados de libertad $v_2 = v_3 = 12$. En particular $B=4.16$ y $A=1/B$, de lo que resulta:

$$\begin{aligned}
 L_{menor} &= \frac{S_2^2 / S_3^2}{B} = \frac{1.46}{4.16} = 0.351 \quad (17) \\
 L_{mayor} &= \frac{S_2^2 / S_3^2}{A} = \frac{1.46}{1/B} = 6.073
 \end{aligned}$$

Los límites para una confianza del 50% resultan:

$$L_{menor} = \frac{S_2^2 / S_3^2}{B} = \frac{1.46}{1.49} = 0.98$$
$$L_{mayor} = \frac{S_2^2 / S_3^2}{A} = \frac{1.46}{1/B} = 2.17$$

(18)

Dentro de estos intervalos de confianza podemos asegurar que se encuentran los promedios de desvío estándar de los experimentos de filtrado pasa altos y pasa banda.

4. CONCLUSIONES

El experimento factorial ahorra significativamente tiempo de desarrollo y análisis de los experimentos y da una idea más certera de cómo continuar con la experimentación.

Se concluye que con el análisis de los datos medidos se puede justificar la utilización de un filtro con la seguridad que se producirá una disminución en la varianza de la estimación del retardo y por ende una mejora en la estimación del ángulo de la fuente.

Para la validación de este resultado se deberán realizar más experimentos de campo. En tales experimentos, deberán incluirse más datos sobre las condiciones del ensayo, siguiendo la metodología del experimento factorial, a fin de contemplar la influencia de otros factores como clima, ruido ambiente, etc. Estos factores pueden modificar la respuesta del sistema y hasta ahora no han sido tenidos en cuenta como variables a la hora de diseñar las experiencias de campo o las modificaciones del sistema.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Nacional del Sur (PGI 24/ZK12) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT Nro. 14628)

REFERENCIAS

- Box G.E.P, Hunter W.G., Hunter J.S (1978) *Statistics for Experimenters. ed. John Wiley & Sons.*
- Julian, P. Andreou, A.G. Cauwenberghs, G. Stanacevic, M. Goldberg, H. Mandolesi, P.S. Riddle, L. Shamma, S. (2005). Field test results for low power bearing estimator sensor nodes. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2005. ISCAS 2005. pp. 4205 - 4208 Vol. 5
- Li D., K. D. Wong, Y. H. Hu and A. M. Sayeed, (2002) Detection, Classification, And Tracking Of Targets, IEEE Signal and Processing Magazine, 17-29, Marzo 2002.

Martin Pirchio F., S. Sañudo, H. Gutierrez, P. Julián (2006), An acoustic surveillance unit for energy aware sensor networks: Construction and experimental results, IBERCHIP 2006, Marzo 2006

Rabaey J. M., J. Ammer, T. Karalar, S. Li, B. Otis, M. Sheets and T. Tuan, (2002). PicoRadios for Wireless Sensor Networks: The Next Challenge in Ultra-Low Power Design, Proc. International Symposium on Solid State Circuits Conference (ISSCC), paper TD 12.3, 2002.