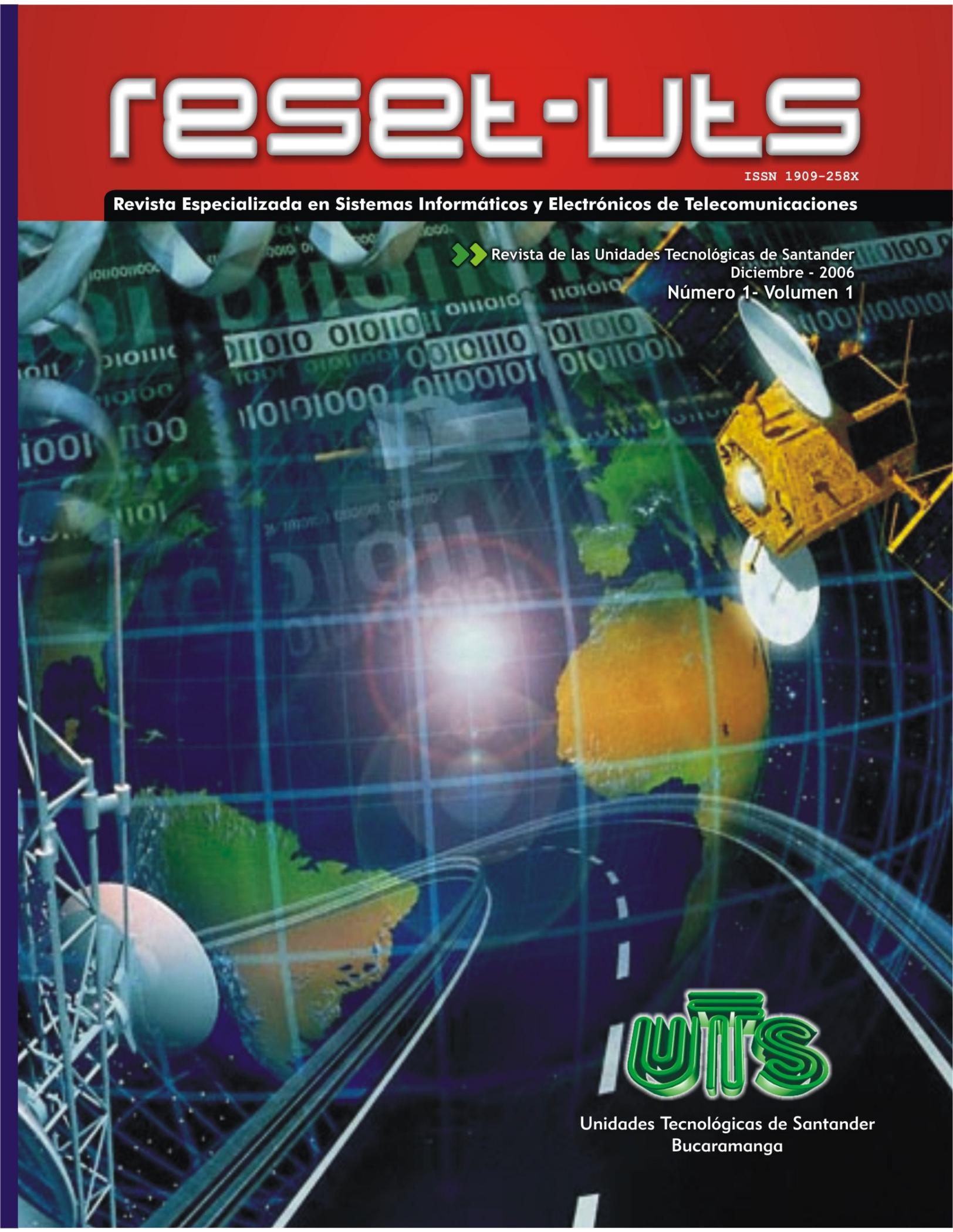


reset-UTS

ISSN 1909-258X

Revista Especializada en Sistemas Informáticos y Electrónicos de Telecomunicaciones

▶▶ Revista de las Unidades Tecnológicas de Santander
Diciembre - 2006
Número 1- Volumen 1

The cover art is a digital collage. It features a satellite in the upper right quadrant, a globe of the Earth in the center, and a grid of blue lines overlaid on the globe. Binary code (0s and 1s) is scattered throughout the background. In the lower left, there is a stylized antenna or tower structure. The overall color palette is dominated by blues, greens, and yellows, with a bright light source creating a lens flare effect in the center.

UTS

Unidades Tecnológicas de Santander
Bucaramanga



ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN PASIVA Y SEGUIMIENTO BIDIMENSIONAL PARA UNA FUENTE ACÚSTICA

Ricardo Alzate Castaño

Magíster en Automatización Industrial
Grupo de Sistemas No Lineales, Redes y Control (SINCRO)
Universidad de Nápoles Federico II
r.alzate@unina.it
Italia

Germán Castellanos Domínguez

Doctor en Telecomunicaciones
Grupo de Control y Procesamiento Digital de Señales
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
cgcastellanosd@unal.edu.co
Colombia

RESUMEN. Se presenta la implementación de un algoritmo para efectuar localización pasiva y seguimiento bidimensional de una fuente acústica empleando como base las técnicas de tiempo diferencial de arribo y filtro de Kalman. En favor de reducir la carga computacional empleada y facilitar su posterior implementación en línea, se ejecuta un análisis basado en la función de correlación cruzada como proceso central de cálculo del parámetro (ángulo de incidencia), complementado por un procedimiento de suavizado (smoothing) a partir de estimación recursiva de un modelo lineal Gaussiano en coordenadas cartesianas, aplicado sobre el conjunto de señales generadas por una configuración lineal de 3 micrófonos. Los resultados obtenidos a baja velocidad (constante) de desplazamiento de la fuente y una distancia de separación de 20 [cm] entre los elementos receptores, demuestran consistencia de posicionamiento para fuentes con características apreciables de aleatoriedad dentro de un rango de alcance comprendido por la región de ángulo $[-45^\circ, 45^\circ]$ y radio $[0, 1.5]$ en [m], tomando como referencia el punto central del arreglo de captura de señal.

Palabras claves. Auto-correlación, estimación recursiva, filtro de Kalman, fuente acústica, localización pasiva, tiempo diferencial de arribo.

ABSTRACT. The implementation of an algorithm aimed to develop passive acoustical source localization and tracking, is presented employing as reference framework the techniques of time difference of arrival and Kalman filtering. In order to reduce the computational effort and make easier an on-line implementation, a cross-correlation based approach is proposed for parameter calculations (incidence angle), followed by recursive estimation of a linear Gaussian model in Cartesian coordinates (smoothing), being applied over the signal set given by a linear 3 microphone array configuration. The results derived for a constant low velocity value on source motion and 20 [cm] of array element distance, shows highly agreement of positioning for random source signals within a scope region defined by $[-45^\circ, 45^\circ]$ angles and $[0, 1.5]$ [m] of radio, taking as geometrical reference the central point on the microphone array.

Keywords. Auto-correlation, recursive estimation, Kalman filtering, acoustical source, passive localization, time difference of arrival.

INTRODUCCIÓN

El procesamiento digital de señales, adopta en el análisis de escenas auditivas (ASA Auditory Scene Analysis) una manera de emular el comportamiento cerebral respecto a su capacidad para reconocer sonidos a partir de descripciones mentales separadas, efectuadas sobre diferentes eventos en un entorno determinado [4]. Las aplicaciones para este tipo de modelos de percepción artificial incluyen entre otras: apoyo auditivo en prototipos robotizados [10], localización de objetivos en sistemas de seguridad, equipos radar/sonar para sistemas de navegación [9] y localización de hablantes en entornos de videoconferencia [14]. Sin embargo la implementabilidad y efectividad de los algoritmos de proceso disponibles para determinada aplicación, dependen en gran medida de las condiciones de propagación del medio, la cantidad de señales involucradas y el dispositivo (hardware) destinado para llevar a cabo su ejecución final [12].

Análogamente, en un amplio margen de aplicaciones de técnicas de proceso de señal, particularmente en el caso de bioseñales [5], se asumen condiciones idealizadas de captura, dadas las características especiales de adquisición (en la mayoría de los casos por contacto directo) que relegan a un segundo plano consideraciones respecto a singularidades de propagación acústica involucradas, eje central en procedimientos con señales de ultrasonido [13] (ecografías) o análisis de sonidos cardiacos [5] (auscultación), cuyo grado de complejidad a nivel de proceso e implementación, dependen en gran medida de la cantidad de canales de información o derivaciones que deben ser manipulados por unidad de tiempo [5].

Por tanto, el presente artículo propone un procedimiento de procesamiento paralelo (múltiple) de señales, que utilizando como modelo el evento de localización pasiva de un objetivo en un plano, ilustra el problema fundamental de detección y caracterización sobre condiciones de adquisición no ideales [3][8]. Adicionalmente, se plantea una solución computacionalmente eficiente en términos de una eventual implementación en tiempo real, tomando como referencia métodos clásicos sugeridos en la literatura [3] [12] [14], al igual que consideraciones adicionales respecto a configuración de dispositivos de captura de señal [6].

La distribución de contenidos incluye: en la sección 1, una introducción al método de tiempo diferencial de arribo (TDOA time difference of arrival) empleado como técnica de base para efectuar localización pasiva de objetivos. La sección 2, describe un procedimiento complementario por filtro de Kalman (smoothing) que proporciona robustez a la estima de localización. La sección 3, ilustra el algoritmo propuesto y la metodología empleada para ejecutar su implementación en línea. En la sección 4, se presentan los resultados más representativos derivados de procedimientos experimentales, que se discuten posteriormente en la sección 5. Finalmente, en la sección 6 se genera una conclusión general.

1. LOCALIZACIÓN EN UN CAMPO DE SONIDO

Sea un campo de sonido compuesto por una fuente y dos receptores con distancias de propagación d_a y d_b tal y como se muestra en la Figura 1. Las señales acústicas detectadas por una pareja de transductores (que bien pueden ser micrófonos) ubicados en los puntos a y b, pueden describirse a partir de [8]:

$$\begin{aligned} a(t) &= s(t) + \eta_a(t) \\ b(t) &= \alpha_b s(t - \tau_d) + \eta_b(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $s(t)$ es la señal acústica debida a la fuente y medida desde el transductor a, al tiempo que α_b constituye un factor de amplificación o atenuación debido a la diferencia de distancias de separación entre la fuente y los receptores. Adicionalmente, se representan como $\eta_a(t)$ y $\eta_b(t)$ a los componentes independientes de ruido sobre cada transductor (no correlados entre ellos ni respecto a la fuente). Si la fuente se considera suficientemente alejada de los receptores relativo a la distancia entre los mismos, puede asumirse $\alpha_b \cong 1$, simplificando la expresión para $b(t)$ [8]:

$$b(t) = s(t - \tau_d) + \eta_b(t) \quad (2)$$

Luego, el tiempo de retardo, correspondiente a la diferencia entre la llegada del frente de onda acústico sobre los puntos a y b, se denota como τ_d y es calculado a partir de:

$$\tau_d = \frac{d_b - d_a}{c} \quad (3)$$

Donde c equivale a la velocidad de propagación del sonido en el aire.

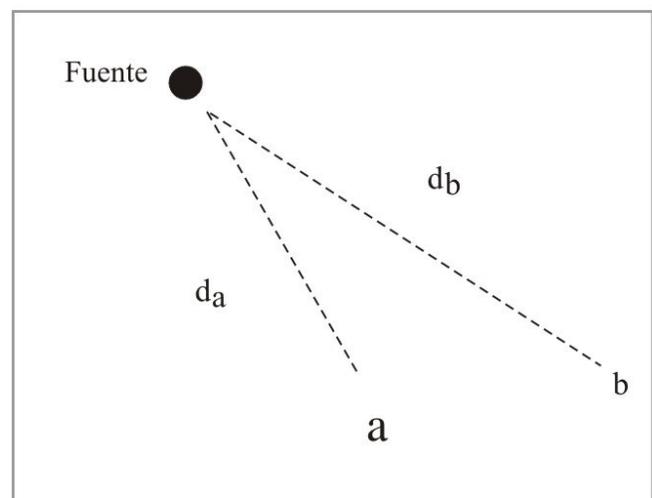


Figura 1. Campo acústico simple

1.1 ESTIMACIÓN DE RETARDOS

Tomando como referencia la clasificación dada en [8], es posible considerar 3 principales grupos de técnicas orientadas a extraer información de incidencia acústica y tiempos de retardo, a partir de información acústica percibida por múltiples dispositivos receptores, estratégicamente localizados:

1.1.1 Intensidad del sonido. La dirección del flujo de energía acústica puede medirse utilizando métodos de intensidad del sonido, en los cuales el producto de la presión y la velocidad ejercidos sobre una partícula de onda viajera entre un par de receptores, genera una medida de la intensidad a lo largo de una línea entre sus centros acústicos. Las tres cantidades vectoriales de intensidad de sonido medidas desde igual cantidad de pares de transductores, pueden combinarse a fin de obtener un vector tridimensional para aproximar la dirección del flujo de energía acústica. Un vector apuntando en la dirección opuesta a dicho flujo, puede usarse como un estimado de la dirección de la fuente incidente [8].

Esta clase de técnicas, aunque permiten obtener altos rangos de resolución y alcance, presentan como desventaja la necesidad de operar con amplias cantidades de información para realizar juicios acertados (dada su naturaleza de operación sobre dominios estadísticos) generando un alto costo computacional implicado. A tales aproximaciones, se les denomina comúnmente *conformadores de haz* (Beam forming). En [1] se realiza una descripción para este tipo de alternativas, fundamentada en el concepto de filtrado espacial.

1.1.2 Fase espectral de potencia. Una técnica alternativa para determinar incidencia direccional, consiste en utilizar información acústica del TDOA en un frente de onda, estimado a partir del espectro cruzado de las salidas de dos transductores separados espacialmente. La fase de este espectro cruzado, contiene información respecto al retardo relativo entre el par de receptores [11]. Si $X(\omega)$ corresponde a la transformada de Fourier de $x(t)$, entonces a un retardo de la señal temporal corresponde una modificación de fase en el dominio de la frecuencia. En el caso de un campo de sonido simple como el descrito en la expresión (1), es posible definir un espectro cruzado complejo, como medida relativa de las señales entre ambos transductores, por medio de:

$$S_{ab}(\omega) = S_{ss}(\omega)e^{-j\omega\tau_d} \tag{4}$$

Donde S_{ss} corresponde al estimado promedio del auto espectro de la fuente en cada punto de medida, y donde el término exponencial contiene información concerniente al tiempo de retardo relativo entre componentes [11].

1.1.3 Correlación cruzada. Es el método más común para determinar el tiempo de retardo τ_d entre dos señales $a(t)$ y $b(t)$, a partir de la siguiente expresión en términos de un retardo relativo τ [1]:

$$R_{ab}(\tau) = E[a(t)b(t+\tau)] \tag{5}$$

Donde $E[.]$ denota el valor esperado. La correlación cruzada entre dos señales provenientes de puntos diversos de arribo de señal, tal y como se describe en la expresión (1), puede expresarse a partir de:

$$R_{ab}(\tau) = R_{ss}(\tau - \tau_d) \tag{6}$$

Donde $R_{ss}(\tau)$ representa la auto correlación de la fuente $s(t)$ transpuesta para obtener su valor pico en $\tau = \tau_d$. Por tanto, si la velocidad de propagación del sonido c es conocida, el tiempo de retardo τ_d medido entre dos puntos de medida a y b puede relacionarse con un ángulo de incidencia que satisface:

$$\cos\theta = \frac{c\tau_d}{d_{mic}} \tag{7}$$

Donde d_{mic} corresponde a la distancia de separación entre el par de elementos receptores [1].

1.2 POSICIONAMIENTO DE FUENTES

Una vez que la información para tiempos de retardo ha sido calculada, desde un par de transductores con distancia de separación conocida, la dirección de la fuente puede derivarse utilizando información respecto a la velocidad del sonido y geometría del arreglo empleado [6]. Con respecto a este último punto, es posible realizar diversas configuraciones, entre ellas lineal [1], en anillo [13] o distribuciones especiales, que en general dependen de las condiciones acústicas de operación, el método utilizado y los recursos disponibles.

Particularmente, se ilustra el modelo considerado en [8], donde se hace uso de un arreglo de 3 dispositivos, tal y como se visualiza en la Figura 2, para formar dos pares primarios de receptores compuestos respectivamente por r_o-r_x y r_o-r_y . Las parejas de transductores se posicionan a lo largo de ejes ortogonales, en un sistema de coordenadas rectangulares con origen en r_o . Ambos pares primarios de transductores se encuentran separados por una distancia d_{mic} en cada dirección x e y . Luego, si una fuente se considera suficientemente lejos del arreglo, se puede aproximar su posición a partir de una línea que conecte con el centro de cada par.

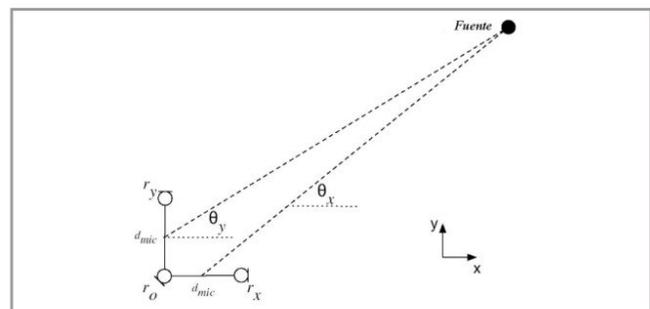


Figura 2. Arreglo de 3 transductores para localización en plano xy

Posteriormente, pueden calcularse los ángulos de incidencia θ_x y θ_y para formar un ángulo resultante azimutal de incidencia θ . Adicionalmente, puede agregarse un tercer par de transductores para generar la coordenada en z que permita calcular información de altitud ϕ a partir de:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\tau^z}{\sqrt{(\tau^x)^2 + (\tau^y)^2}} \right) \quad (8)$$

Donde τ^w corresponde al retardo estimado en el par relacionado con la coordenada w . De esta manera, se conforma la elipse visualizada en la Figura 3, que genera localización tridimensional respecto a la fuente acústica incidente [8].

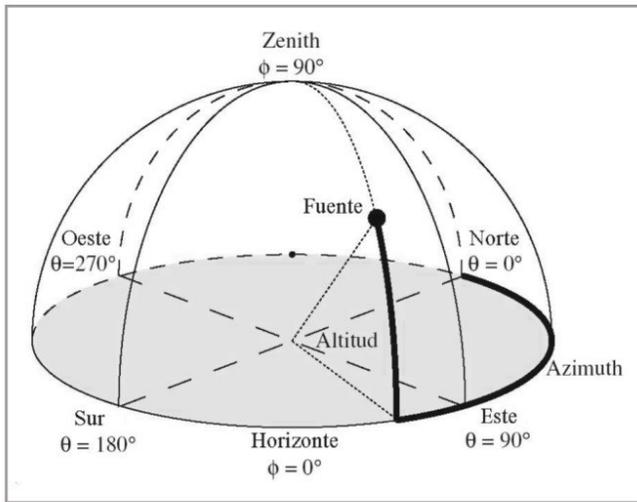


Figura 3. Localización espacial con arreglo de 4 transductores

2. SEGUIMIENTO DE OBJETIVOS

Posterior a una etapa de detección, que en esencia constituye un elemento discriminador de información y de consecuente reducción de datos, se provee un estimado de los parámetros de la señal a partir de la unidad de procesamiento de sensores, constituyendo el conjunto de señales aplicado a la entrada del sistema de seguimiento. En este último se realiza una actualización periódica de la evolución del parámetro a partir de predicciones que toman en cuenta una cantidad limitada de información, buscando obtener una disminución de los cálculos implicados [13].

Formalmente, se considera la dinámica de una secuencia de estados $\{x_k, k \in \mathbb{E}\}$ en relación con un objetivo, a partir de [2]:

$$x_k = f_k(x_{k-1}, w_{k-1}) \quad (9)$$

Donde $f_k: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una función (posiblemente no lineal) del estado x_{k-1} , $\{w_{k-1}, k \in \mathbb{E}\}$ es un proceso de ruido independiente e idénticamente distribuido (i.i.d-independent and identically distributed), n y m son las dimensiones para los vectores de estado y de proceso de ruido respectivamente y \mathbb{E} es el conjunto de los números naturales. El objetivo del seguimiento consiste en la estimación recursiva para x_k a partir del modelo de medición [2]:

$$z_k = h_k(x_k, v_k) \quad (10)$$

Donde $h_k: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^p$ es una función (posiblemente no lineal), $\{v_k, k \in \mathbb{E}\}$ es una secuencia de ruido de medición i.i.d, al igual que n y p corresponden respectivamente a las dimensiones de los vectores de estado y medida. En particular se buscan estimados para x_k a partir del conjunto de mediciones disponibles $z_{1:k} = \{z_i, i = 1, \dots, k\}$ hasta un tiempo k [2].

2.1 FILTRO DE KALMAN COMO SISTEMA DE SEGUIMIENTO

El filtro de Kalman encuentra aplicación frecuente en los problemas de seguimiento [7]. Un objetivo, como bien puede ser un aeroplano detectado por una instalación de radar, genera mediciones ruidosas respecto a su posición. El principal argumento de un sistema de seguimiento corresponde entonces a generar un estimado suficientemente consistente respecto a su velocidad y a su posición, empleando las medidas provenientes del sistema de sensado (radar) y la menor cantidad de información redundante.

Analizando el caso de un objetivo simple para el cual se considera seguimiento respecto a la posición bidimensional, se plantea el siguiente modelo en el espacio de estados continuo [7]:

$$\dot{\hat{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} w(t) \quad (11)$$

Donde $\bar{x}(t)$ corresponde al vector de estados definido como:

$$\hat{\bar{x}}(t) = [x(t) \quad \dot{x}(t) \quad y(t) \quad \dot{y}(t)]^T \quad (12)$$

Es decir, se compone por las posiciones y las velocidades en sus ejes cartesianos. En la misma medida el vector de entradas $w(t)$ [7]:

$$w(t) = \begin{bmatrix} w_x(t) \\ w_y(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

se considera un ruido de proceso, tipo blanco Gaussiano de media cero, que modifica levemente la presunción de un desplazamiento con velocidad constante y que interactúa con cada una de sus componentes a partir de una matriz de covarianza dada por:

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{w_x}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{w_y}^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Denotando σ^2 a la varianza de ruido sobre cada componente. Análogamente se considera un modelo de medida definido por [7]:

$$z(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \bar{x}(t) + v(t) \quad (15)$$

Siendo $v(t)$ un ruido de medida, de tipo blanco Gaussiano de media cero, actuando sobre cada componente:

$$v(t) = \begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Y con matriz de covarianza dada por:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{v_x}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{v_y}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Para efectos de implementación es conveniente obtener un modelo en espacio de estados discreto [7]:

$$\bar{x}[n+1] = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{x}[n] + w[n] \quad (18)$$

Donde T_s es el periodo de discretización y $w[n]$ se define como:

$$w[n] = [w_x[n] \quad \dot{w}_x[n] \quad w_y[n] \quad \dot{w}_y[n]] \quad (19)$$

Finalmente la versión discretizada para la ecuación de medida corresponde con [7]:

$$z[n] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \bar{x}[n] + v[n] \quad (20)$$

Representando $v[n]$ a un ruido de medida bidimensional. Por tanto, empleando un algoritmo recursivo como el presentado en [1], puede obtenerse actualización periódica para los estimados de posición (estados del modelo discreto) a partir de la medida entregada por el sistema de localización, como consecuencia del proceso efectuado sobre las señales sensadas en el arreglo de receptores [6].

3. MARCO EXPERIMENTAL

A continuación, se describe la metodología de implementación desarrollada para ejecutar las consideraciones teóricas descritas en los apartados anteriores.

3.1 SELECCIÓN DE ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN

Empleando el editor de código de Matlab®, se analiza el desempeño de las técnicas de cálculo para tiempos diferenciales de arribo por

fase espectral de potencia y función de correlación cruzada, empleando como señales de prueba parejas de registros relativamente retardados correspondientes a tonos sinusoidales, señales pseudo aleatorias y segmentos de voz sobre diversas condiciones de ruido aditivo. El algoritmo de mejor desempeño será aquel que presente una estimación eficiente para el retardo relativo en el par de señales aplicado, aún ante la presencia de componentes considerables de ruido.

3.2 IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO DE SEGUIMIENTO

Utilizando el editor de código de Matlab®, se desarrolla la implementación del algoritmo recursivo implicado en las ecuaciones (18) y (20). Para verificar las condiciones de seguimiento, se escogen trayectorias de referencia y se analiza la evolución del sistema sometido a una perturbación de tipo Gaussiano. La dinámica de la matriz de covarianza del estimador, dará indicación de las características de convergencia para el error de estima.

3.3 ACOPLAMIENTO, ADECUACIÓN Y EJECUCIÓN EN LÍNEA

Los resultados para el mejor algoritmo de localización, acoplados como información de entrada para el sistema de seguimiento debidamente inicializado, son replicados en el entorno gráfico Simulink® como paso intermedio para una posterior implementación en línea. Dicha ejecución se desarrolla empleando la plataforma integrada (hardware/software) LabView®, configurada para emplear paralelamente 3 canales de registro, correspondientes a las señales de 3 micrófonos distribuidos en un arreglo lineal uniforme (ver Figura 2).

3.4 VALIDACIÓN DE ALGORITMO IMPLEMENTADO

Finalmente, para validar el desempeño del sistema implementado se obtienen registros de las trayectorias estimadas para el caso de una fuente con desplazamiento lineal y de velocidad constante de aproximadamente 0.06 [m/s], empleando un motor (lineal) impulsado por un dispositivo de control de velocidad (ver Figura 4). La fuente sonora incidente corresponde a un altavoz reproduciendo registros continuos de señal pseudo aleatoria y un tono sinusoidal de 800 Hz (frecuencia de diseño del arreglo de captura [1]).

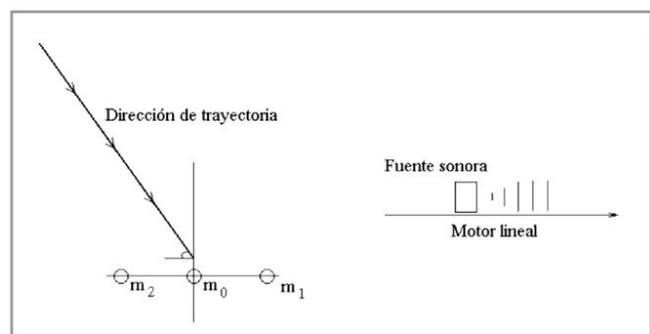


Figura 4. Ilustración para condiciones de registro

4. RESULTADOS

De una manera consistente con los numerales del marco experimental, se presentan a continuación resultados obtenidos en cada una de las fases.

4.1 SELECCIÓN DE ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN

En las Figuras 5 y 6 se muestran resultados de estimación para el retardo relativo entre componentes desplazadas de una señal de voz afectada por ruido de $\sigma = 0.5$. Es evidente que el método basado en la función de correlación cruzada (Figura 5) ofrece mayor robustez a partir de la conservación de las características de estimación en su valor máximo, en oposición a la distorsión de fase presente en el método espectral (Figura 6).

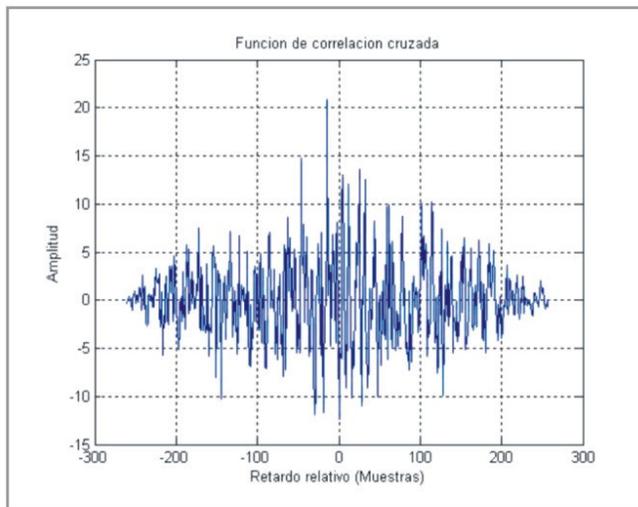


Figura 5. Estimación de retardo por función de auto correlación

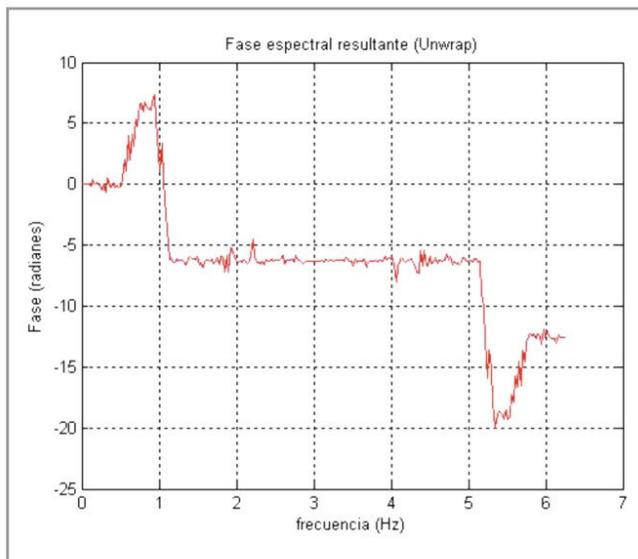


Figura 6. Estimación de retardo por fase espectral de potencia

4.2 IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO DE SEGUIMIENTO

Como se observa en la Figura 7, el seguimiento de trayectorias obtenido en resultados de simulación es consistente, convergiendo en pocas épocas de iteración para variaciones lentas del objetivo.

4.3 ACOPLAMIENTO, ADECUACIÓN Y EJECUCIÓN EN LINEA

En la Figura 8, se muestra un resultado típico de cálculo para tiempos de retardo obtenido en tiempo de ejecución, a partir de las parejas de señales capturadas por los dispositivos transductores. La claridad de la forma de onda generada refleja la efectividad del método implementado.

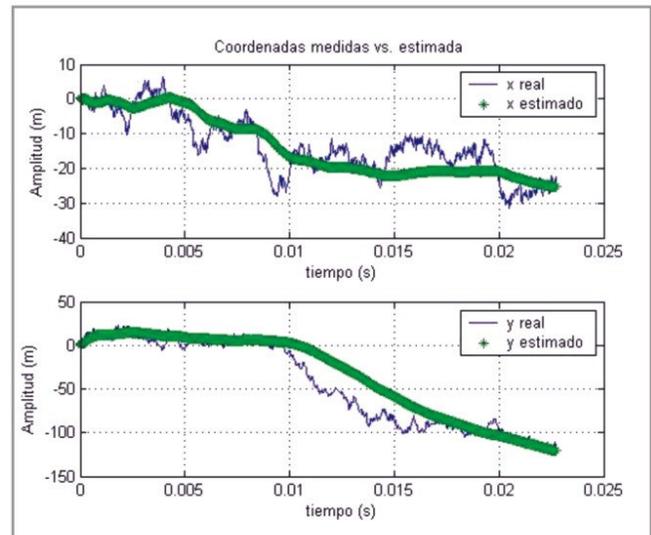


Figura 7. Estimación de trayectorias empleando filtro de Kalman

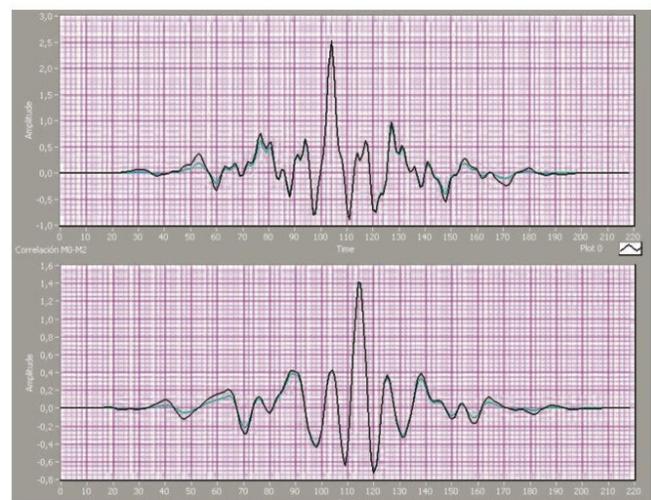


Figura 8. Ilustración de función de correlación cruzada obtenida en tiempo real.

4.4 VALIDACIÓN DE ALGORITMO IMPLEMENTADO

Complementando resultados similares a los ilustrados en la Figura 8, a partir del cálculo del ángulo de incidencia, es posible determinar las coordenadas de localización de la fuente incidente para diferentes puntos de prueba. En la Tabla 1 se incluyen algunos resultados, revelando una mayor precisión de medida para señales de tipo pseudo aleatorio localizadas en cercanía del arreglo de captura.

Punto	Coordenada x real [m]	Coordenada x aleatoria [m]	Coordenada x sinusoidal [m]
1	-0.1	-0.11	-0.12
2	-0.13	-0.19	-0.36
3	-0.16	-0.28	-1.51
4	-0.2	-0.36	1.36
5	-0.3	-0.86	-1.20
Punto	Coordenada y real [m]	Coordenada y aleatoria [m]	Coordenada y sinusoidal [m]
1	0.16	0.26	0.51
2	0.27	0.45	1.10
3	0.38	0.66	4.34
4	0.48	0.79	-4.32
5	0.7	1.82	-0.20

Tabla 1. Coordenadas medidas en puntos de incidencia estáticos

Análogamente, la Figura 9 ilustra el efecto de suavizado (smoothing) generado por el estimador de trayectorias.

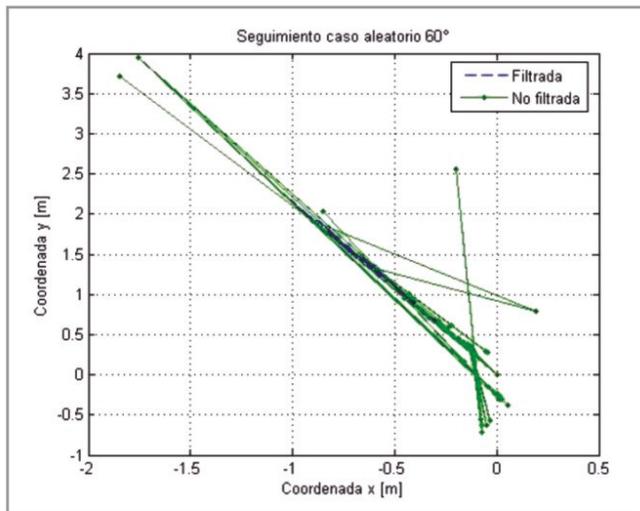


Figura 9. Efectos de suavizado por filtro de Kalman sobre registros de trayectoria lineal a velocidad constante

5. DISCUSIÓN

Las características del sistema de localización y particularmente de la distribución geométrica del sistema de captura empleado (lineal uniforme), implican una resolución limitada de puntos (grilla)

dentro de los cuales puede localizarse la fuente incidente en un instante determinado. A partir de esta restricción se introducen errores de indeterminación que se hacen más notorios en la medida que la fuente se aleja de los dispositivos de captura (ver Tabla 1).

Para aumentar la precisión de medida en términos del rango de frecuencias y la distancia de incidencia, puede realizarse una combinación mayor de micrófonos o emplear aquellos que presenten mejores especificaciones técnicas (patrón de sensibilidad y respuesta frecuencial).

Al emplear emisión de señales de tipo aleatorio se observa un considerable incremento en la precisión de la medida de localización debido a una reducción de incertidumbre en el máximo global de la función de correlación cruzada (Figuras 5 y 8).

A partir de los resultados del sistema de seguimiento (Figuras 7 y 9) es posible ratificar la validez del modelo en espacio de estados asumido para llevar a cabo la estimación de las variables de proceso.

Finalmente los resultados de localización obtenidos por el sistema en tiempo real (contenidos en la Tabla 1) generan un comportamiento análogo a los generados por las pruebas de simulación en términos de resolución y rango, demostrando la dependencia del sistema implementado ante condiciones de captura de señal. No obstante, considerando el acceso a un conjunto de señales con información suficientemente descriptiva (arreglo de mayor resolución y alcance) se asume por parte del prototipo una estimación de localización y seguimiento adecuada en tiempo de ejecución.

6. CONCLUSIÓN

El sistema implementado realiza de manera eficiente la localización pasiva bidimensional y el seguimiento en tiempo real para una fuente acústica puntual de señal aleatoria con reducida velocidad de desplazamiento, siempre que incida al interior de la región de ángulo $[-45^\circ, 45^\circ]$ y radio $[0, 1.5]$ en [m], tomando como referencia el punto central de un arreglo lineal de 3 micrófonos con distancia de separación relativa de 20 [cm], empleando combinación de las técnicas de TDOA por función de correlación y de filtro de Kalman con modelo de medición en coordenadas cartesianas.

7. REFERENCIAS

[1] ALZATE, R. Detección Múltiple en Tiempo Real para Localización de una Fuente Acústica. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. 2006.

[2] ARULAMPALAM, M. S. y MASKELL, S. y GORDON, N. y CLAPP, T. A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/non-gaussian Bayesian Tracking, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol 50. No 2. Febrero, 2002.

- [3] BRANDSTEIN, M. S. y SILVERMAN, H. F. A Practical Methodology for Speech Source Localization with Microphone Arrays, Division of Engineering and Applied Sciences. Harvard University, 1996.
- [4] BREGMAN, A. S. Auditory Scene Analysis: The perceptive organization of sound. USA: MIT Press, 1994.
- [5] CASTELLANOS, G. y GARCIA J. Análisis Automatizado de Señales Cardíacas. Grupo de Control y Procesamiento Digital de Señales. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Proyecto financiado por DIMA. 2003.
- [6] HABETS, E. A. P. y SOMMEN, P. C. W. Optimal Microphone Placement for Source Localization using Time Delay Estimation, Eindhoven University of Technology, 2002.
- [7] KAMEN, E. W. y SU J. K. Introduction to Optimal Estimation. UK: Springer, 1999. p. 1-22, 69-98, 149-185, 225-263.
- [8] KIRKWOOD, B. C. Acoustic Source Localization using Time-delay Estimation, Technical University of Denmark, 2003.
- [9] MASKELL, S. y BRIERS, M. y WRIGHT, R. Tracking using a Radar and a Problem Specific Proposal Distribution in a Particle Filter, QINETIQ Researching group. Worcestershire. United Kingdom, 2004.
- [10] NAKADAI, K. y HIDAI, K. y MIZOGUCHI, H. y OKUNO, H. G. y KITANO, H. Real-time Auditory and Visual Multiple-object Tracking for Humanoids, Department of Intelligence Science and Technology. Kyoto University. Kyoto. Japón, 2001.
- [11] OMOLOGO, M. y SVAIZER, P. Acoustic Event Localization using a Crosspower-spectrum Phase Based Technique, IRST - Istituto per la Ricerca Scientifica e Tecnologica. Povo di Trento. Italia, 1994.
- [12] RABINKIN, D. V. y RENOMERON, R. J. y DAHL, A. y FRENCH, J. C. y FLANAGAN, J. L. A DSP Implementation of Source Location using Microphone Arrays, Center for Computer Aids for Industrial Productivity. Rutgers University. USA, 1996.
- [13] STERGIPOULOS, S. Advanced Signal Processing Handbook: theory and implementation for radar sonar and medical imaging real time systems. USA: CRC Press, 2001. p. 4-1/4-27,6-1/6-67,8- 1/9-21,11-1/12-13.
- [14] STROBEL, N. y RABENSTEIN, R. Classification of Time Delay Estimates for Robust Speaker Localization, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. USA, 1999.