



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

COMPARACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN ACÚSTICA EN EL DETECTOR DE NEUTRINOS KM3NeT

PACS: 43.30.Xm

D. Tortosa, Dídac¹; Ardid Ramírez, Miguel²; Martínez Mora, Juan A.³
Universitat Politècnica de València. C/Paranimf, 1. 46730. Gandia, València. Spain.
Tel: (+34)963870000 ext. 43681
E-Mail: ¹didieit@upv.es; ²mardid@fis.upv.es; ³jmmora@fis.upv.es

Palabras Clave: Detección Acústica, Sistema de Posicionamiento, KM3NeT, Acústica Submarina.

ABSTRACT

This work presents different methods of processing a received signal to optimize the acoustic detection on the acoustic positioning system of the KM3NeT neutrino telescope. Now, the acoustic positioning system installed is based on measuring the distances between the position of known emitters and the unknown position of the receiver (a piezoelectric sensor installed in the spheres that contain the optical sensors of the telescope) The spheres are located in vertical lines using buoys, and then in movement because the sea current. in order to determinate the best method for the acoustic detection for this application, theoretical studies and simulations are done to study the precision and stability of each method.

RESUMEN

En el presente trabajo se presentan distintos métodos de tratamiento de la señal con el fin de optimizar la detección acústica del sistema de posicionamiento acústico del telescopio de neutrinos KM3NeT. Actualmente, se ha implementado un sistema acústico para medir distancias entre las posiciones conocidas de emisores y la que se quiere conocer del receptor (sensor piezoeléctrico ubicado en las esferas que contienen los sensores ópticos del telescopio). Estas esferas, ubicadas en líneas verticales mediante boyas, están en constante movimiento debido a las corrientes marinas. Para valorar la mejor opción de detección acústica se estudia de forma teórica y con simulaciones, la precisión y estabilidad de cada método.

INTRODUCCIÓN

El detector submarino de neutrinos más grande del mundo se encuentra en desarrollo y se situará en el Mar Mediterráneo. KM3NeT se compone por dos infraestructuras de detección con diferentes objetos de estudio, una primera localizada a 40km de la costa de *Toulon* a 2500m de profundidad, llamada ORCA, con 115 unidades de detección repartidas en un volumen aproximado de 0.018km^3 ; y una segunda, localizada a 100km de la costa de *Porto di Capo Passero* a unos 3500m de profundidad, con el nombre de ARCA, con 220 unidades de detección repartidas en un volumen aproximado de 1km^3 . Cada DU (Unidad de Detección) se compone por 18 Módulos Ópticos de Detección (DOMs, esferas detectoras) [1]. En su primera fase de desarrollo, se empezó por instalar 1 DU en ORCA y 2 DU en ARCA, para poder estudiar el comportamiento *in situ* y seguir estudiando y optimizando su diseño.

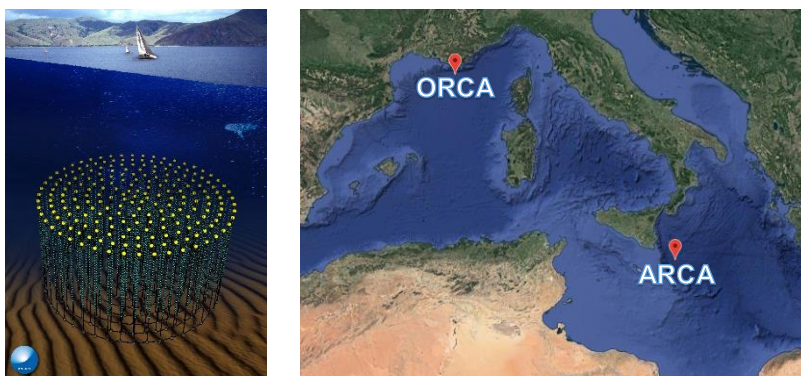


Figura 1: Esquema de una infraestructura de detección (izq.) y localización de KM3NeT (der.)

Como se observa en la *Figura 1* (izq.), KM3NeT se integra de DUs ancladas al fondo marino, y mantenidas en vertical mediante una boya en el extremo de la línea de sujeción. Esta configuración supone que las corrientes marinas mantengan las líneas en constante movimiento, desplazando así los DOMs.

Para poder reconstruir la dirección del neutrino detectado por los DOMs, es necesario conocer la posición exacta de cada uno en el momento del evento. No es posible geolocalizar cada DOM con señales GPS, ya que estas no alcanzan las profundidades a las que se encuentra KM3NeT, por eso se abastece de un sistema de posicionamiento acústico, el cual se basa en emisiones periódicas desde una fuente anclada al fondo del mar de localización conocida (AB, *Autonomous Beacon*) y se registra la señal recibida en cada DOM, el cual tiene un sensor piezocerámico, y en la base de la DU, con un hidrófono [2].

Así pues, se realizó una campaña de testeo *in situ* del sistema acústico en ORCA en octubre de 2017. Durante los tiempos de emisión, se fueron registrando las grabaciones acústicas en cada DOM y en la base de la DU de 5s de duración. La fuente se encontraba anclada a una distancia de 292m de la base de la DU (ver *Figura 2*).

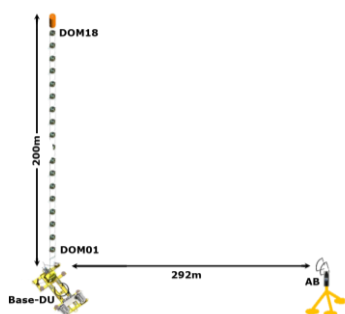


Figura 2: Situación de ORCA 2017

La idea final del sistema de posicionamiento acústico en KM3NeT es, mediante triangulación (al menos 3 emisores), ser capaces de monitorizar de forma automática la posición de los detectores como se tiene en su antecesor ANTARES [3]. Para llegar a conseguir dicho propósito, se debe determinar el método de detección acústica a implementar en el sistema y poder detectar el instante en que se recibe la señal emitida por la/s fuente/s con la máxima precisión posible. Dicho estudio es el que queda documentado en el presente trabajo donde se estudian diferentes métodos de procesado de señal para detección acústica simulando la recepción *in situ* del testeo. Así, los próximos estudios será aplicarlos a los datos experimentales e implantarlos.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

DESARROLLO DEL ESTUDIO

En la primera campaña de prueba para el sistema acústico de KM3NeT, se registraron grabaciones acústicas de 5s de duración en cada DOM durante 10 minutos la mañana del día 7 y durante 5 minutos en la tarde del día 16 de octubre del 2017. En total se obtuvieron casi 2200 archivos que se almacenaron en la base de datos de KM3NeT. El objetivo que tienen estas grabaciones es registrar los pulsos acústicos emitidos por la fuente anclada a 292 metros de la base de la DU. La recepción se obtiene con una frecuencia de muestreo de 195312.5 Hz.

El AB (fuente acústica anclada) emite 6 pulsos periódicamente. Estos pulsos corresponden todos a la misma señal, una sinusoidal a 32kHz de 5ms, pero se distinguen por el tiempo de emisión que hay entre ellos (ver *Figura 3* y *Tabla 1*). Como se desconoce el instante de emisión de los pulsos, estos se identifican según la distancia al pulso contiguo detectado (ver *Tabla 2*). La calidad de la señal recibida (referida a la facilidad de detección de los pulsos) vendrá dada por la medida de la relación señal a ruido (*SNR*). Entre todas las señales recibidas, las que mejor *SNR* presentan, son las recibidas por el hidrófono situado en la base de la DU (la más cercana al AB), que rondan los 30dB, mientras que las que peor *SNR* presentan son las señales captadas por el DOM18 (el más alejado), que rondan los 16dB.

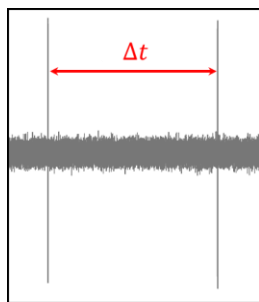


Figura 3: Señal recibida con dos pulsos

Tabla 1: Transición temporal entre pulsos emitidos

Transición entre pulsos:		Δt [s]
1.	Pulso 1 → Pulso 2	2.138
2.	Pulso 2 → Pulso 3	1.982
3.	Pulso 3 → Pulso 4	1.813
4.	Pulso 4 → Pulso 5	1.865
5.	Pulso 5 → Pulso 6	2.034
6.	Pulso 6 → Pulso 1	1.969

Para nuestro estudio, utilizamos estas condiciones como punto de partida. Así pues, se simula la grabación de dos pulsos en una señal acústica ideal, donde el pulso tiene amplitud 1 y el resto 0 (*SNR* = ∞). Después, se le añadirá a la señal ruido blanco, a distintos niveles, para detectar los pulsos con cada método. Dado que el ruido blanco es aleatorio, para obtener cierta estabilidad en los resultados se repetirá hasta 2000 veces, con el fin de poder estudiar la desviación del método según el nivel de ruido. Los niveles de ruido serán los que corresponden a las relaciones *SNR* de 20dB, 10dB, 5dB, 0dB, -5dB y -8dB (éste último límite decidido a partir de un estudio previo donde se demuestra que algunos métodos dejan de detectar los pulsos). Por último, se mezclará la señal de pulsos con el ruido experimental grabado en ORCA durante la campaña de testeo, y se simulará la recepción de los pulsos con una relación *SNR* de 30dB (recepción en la base de la DU) y 16dB (recepción por el DOM18).

Tabla 2: Identificación de pulsos recibidos.

Pulsos	Transición	$\Delta t_{trans.}$	Tiempos de identificación, $t_{id.}$ [s]	$\Delta t_{id.}$ [ms]
3→4	3	1.813s	$1.75 \leq \Delta t_{medido} < 1.839$	89ms
4→5	4	1.865s	$1.839 < \Delta t_{medido} \leq 1.917$	78ms
6→1	6	1.969s	$1.917 < \Delta t_{medido} < 1.975$	85.5ms
2→3	2	1.982s	$1.975 \leq \Delta t_{medido} < 2.008$	32.5ms
5→6	5	2.034s	$2.008 \leq \Delta t_{medido} < 2.086$	78ms
1→2	1	2.138s	$2.086 \leq \Delta t_{medido} \leq 2.008$	89ms

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

El sistema de identificación de pulsos recibidos, rechazará toda transición temporal medida inferior a 1.75s y superior a 2.008s. Dicha detección se identificará como errónea, así se asegura el correcto funcionamiento del sistema y se desestiman los posibles errores.

FILTRADO PREVIO DE SEÑAL

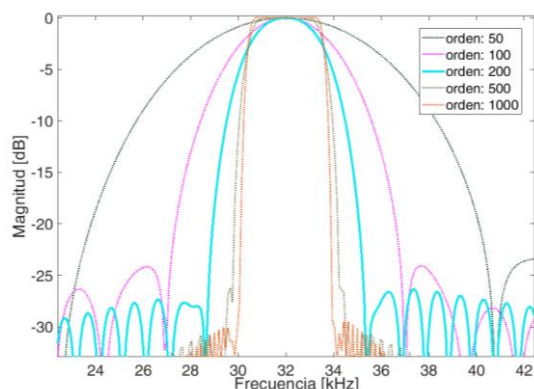


Figura 4: Resupuesta al impulso del filtro diseñado

Complementariamente, se decide realizar el estudio aplicándole a la señal un filtro. Aprovechando que el pulso a detectar es de una frecuencia muy concreta, se diseña un filtro paso-banda con una frecuencia de paso comprendida entre $\pm 5\%$ de la frecuencia central (32kHz), un rizado de 1dB y una atenuación de 60dB. El filtro a aplicar será de orden 200, dado que otros ordenes saturarían el enventanado o presentarían insuficiente filtraje (ver Figura 7). Con dicho filtro conseguimos eliminar las frecuencias de ruidos restantes a la de interés.

Se van a realizar varios métodos de procesado de señal para detectar el instante inicial de recepción, los dos primeros se basan en el método de correlación, otro en un umbral de energía para la señal recibida, y por último dos variantes polinómicas (*pvar*) que parten del uso del umbral.

MÉTODO POR CORRELACIÓN (CORR)

La correlación se usa para determinar la similitud entre dos señales [4]. Al correlar una señal recibida con una enviada (la buscada), la señal de correlación presentará su pico máximo en el instante inicial donde empieza a detectarse la presencia de la señal buscada en la señal recibida. Este pico puede ser muy intuitivo (gran diferenciación), si se tiene una buena *SNR* y la señal recibida está libre de reflexiones.

Así pues, en el presente trabajo se correlarán la señal recibida con el pulso sinusoidal enviado, obteniendo un máximo en la señal de correlación en el instante de detección (ver Figura 4).

MÉTODO POR CORRELACIÓN CON ENVOLVENTE (CORR ENV)

Debido a que la señal recibida no contará con grandes valores de *SNR*, la señal de correlación no presentará un único pico máximo, cosa que podría "ensuciar la medida", por lo que se decide crear una variante del método calculando la envolvente de la señal de correlación, la cual sí presenta un único pico máximo (ver Figura 4).

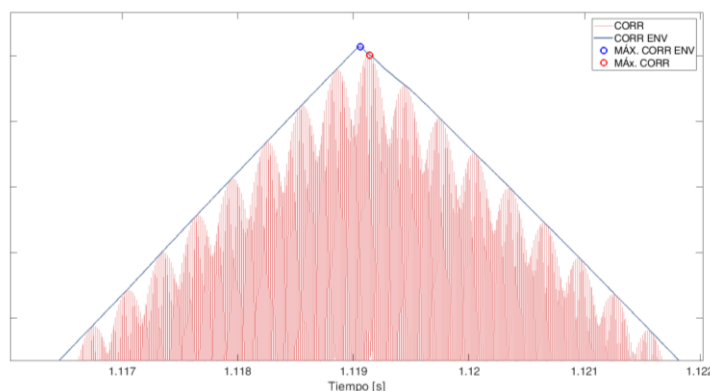


Figura 5: Comparativa entre el método CORR y CORR ENV en una señal ejemplo

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

La diferencia temporal entre ambas medidas (máx. *CORR* y máx. *CORR ENV*) llega en ocasiones a los 200µs, lo que en el entorno de ORCA supone algo más de 30cm de diferencia a la hora de medir distancia entre emisor-receptor. Como se busca la máxima precisión se decide realizar el estudio con ambos métodos y comprobar la eficacia de ambos.

MÉTODO POR UMBRAL (*UMB*)

El método por umbral consiste en definir un valor de energía a partir del cual se encontrarán datos de interés. Debido a que la *SNR* en recepción no es ideal (experimentalmente), se decide colocar en un principio el umbral al 70% del valor máximo de la amplitud de la señal recibida (esto permite detectar señales de hasta 3dB de *SNR* -teóricamente-).

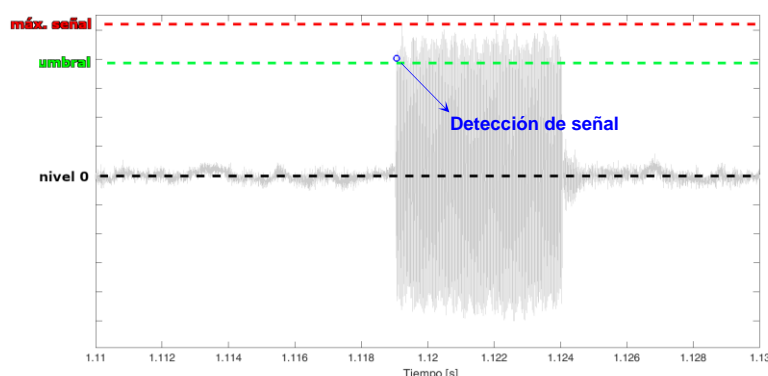


Figura 6: Aplicación del método por umbral en una señal ejemplo

El principal problema que presenta este método en señales experimentales es que si se busca exactitud en la aparición del pulso no es recomendable su uso debido a que la generación del pulso no ha sido ideal y ha necesitado de unas pocas transiciones hasta llegar a la amplitud deseada, lo que provoca un pequeño retardo en la detección.

MÉTODO POR TRANSFORMADA *PVAR-1*

El método de *PVAR-1* hace referencia a un método teórico de detección acústica, el cual consiste en calcular la frecuencia acumulada de la señal recibida en absoluto y detectar los cambios bruscos de pendiente que presenta en ella, los cuales indican la aparición del pulso (ver Figura 6) [5].

Si se tiene la señal muy muestreada, no se observan cambios bruscos entre muestra y muestra de la señal *pvar-1*, lo que imposibilita su tratamiento automatizado directamente. Así que una vez se tiene la transformada *PVAR-1* aplicada, se usa el método de umbral para determinar la presencia del pulso, aunque no con gran exactitud. De aquí, se puede estimar la pendiente del trozo de la recta que contiene pulso sumado con ruido, a la vez que se calcula la pendiente del tramo de ruido (sin pulso). Una vez se tengan ambas pendientes, se pueden reconstruir ambas rectas para detectar el punto de cruce, el cual nos determinará el instante de tiempo de detección con mayor precisión (ver Figura 6).

MÉTODO POR TRANSFORMADA *PVAR-2*

La transformada *PVAR-2* sigue la misma filosofía que su antecesora (explicada en el apartado anterior), la diferencia es que, en vez de calcular la frecuencia acumulada de la señal recibida, se calcula la suma acumulativa de la señal al cuadrado, lo que hace más abrupto el cambio de pendiente entre señal de ruido y señal de ruido con pulso acústico. A esta transformada se le resta el ruido de la transformada original dejando una especie de señal con forma de dientes de sierra la cual presenta un pico máximo al inicio de cada pulso detectado [5].

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Para obtener el punto exacto donde la señal presenta un máximo, se estima la presencia de un pulso por el método de umbral y calculando la pendiente de la recta que coincide con el pulso (más ruido), y con la que sólo tiene ruido, se observa el punto de cruce, el cual coincide con el máximo de la transformada y, por tanto, la detección inicial del pulso (ver *Figura 6*).

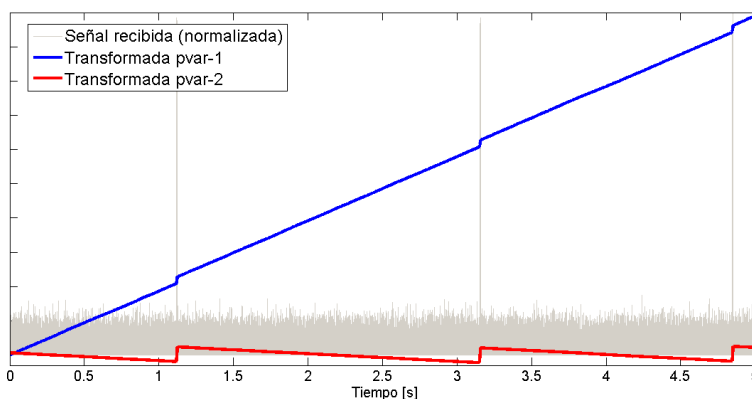


Figura 7: Aplicación de las transformadas PVARs en una señal ejemplo

RESULTADOS

A continuación, se muestra la diferencia media (en absoluto) entre el resultado obtenido por cada método en el cálculo de la identificación del pulso y la diferencia de tiempos de emisión teórica sin procesar la señal, estudiando así la precisión de los métodos (ver *Tabla 3*).

Tabla 3: Diferencia entre resultados obtenidos por los métodos estudiado y los teóricos, sin usar filtro.

SNR (dB)	CORR (µs)	CORR ENV (µs)	UMB (µs)	PVAR-1 (µs)	PVAR-2 (µs)
∞	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
20	0.6	0.6	0.7	0.5	0.5
10	0.6	0.6	1	1.2	0.4
5	0.6	1	2.7	31.8	21.7
0	0.6	0.1	3.4	35.7	4.1
-5	3.7	5.2	3.5	240.3	166.1
-8	1.5	5.5	x	x	x

x: Indica que no ha habido pulsos detectados.

En la siguiente tabla (*Tabla 4*), se muestran los mismos resultados que en la *Tabla 3* pero filtrando la señal previamente.

Tabla 4: Diferencia entre resultados obtenidos por los métodos estudiado y los teóricos, con filtro previo.

SNR (dB)	CORR (µs)	CORR ENV (µs)	UMB (µs)	PVAR-1 (µs)	PVAR-2 (µs)
∞	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
20	0.6	1.6	0.3	4.7	0.6
10	0.9	0.8	0.3	14	2.2
5	0.9	4.2	1.6	2.9	2.7
0	0.6	2.4	17.2	56.3	13.5
-5	2.5	0.2	75.9	60.6	37.7
-8	1.2	0.14	*100140	*99710	*312220

* No se ha logrado detectar el pulso adecuadamente en todos los casos.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Seguidamente, se muestran las desviaciones en los resultados obtenidos por cada método sin usar filtro previo en la señal (ver *Tabla 5*), lo que indica la estabilidad del método.

Todas las señales en formato ideal ($SNR = \infty$) se detectan con desviaciones provocadas por error computacional (menores a 10^{-7} s).

Tabla 5: Desviación en los resultados de cada método sin previo filtrado.

SNR (dB)	CORR (μ s)	CORR ENV (μ s)	UMB (μ s)	PVAR-1 (μ s)	PVAR-2 (μ s)
20	** $3.98 \cdot 10^{-7}$	** $3.98 \cdot 10^{-7}$	13.9	19	9
10	** $3.29 \cdot 10^{-7}$	1.03	19.6	73.6	40.7
5	** $1.23 \cdot 10^{-7}$	3.63	29.7	133	92
0	6.16	11.3	30.6	372	204
-5	10.5	31.8	32	553	645
-8	48.5	65.9	x	x	x

** Las desviaciones menores a 10^{-7} s son coincidencias totales y únicamente muestran el error computacional.

La *Tabla 6* muestra los resultados de desviaciones de cada método aplicando el filtro previo a la señal analizada.

Tabla 6: Desviación en los resultados de cada método usando filtrado.

SNR (dB)	CORR (μ s)	CORR ENV (μ s)	UMB (μ s)	PVAR-1 (μ s)	PVAR-2 (μ s)
20	** $1.47 \cdot 10^{-7}$	3.5	2.82	** $1.78 \cdot 10^{-7}$	8.5
10	0.36	10	15.9	54.9	23.8
5	4.31	18	27.6	86.7	52.5
0	8.20	33	78.2	120	120
-5	45.5	48.6	454	323	330
-8	55.7	44.3	*608	*6070	*8250

Los resultados para las señales mezcladas con ruido experimental de la campaña *in situ* con una SNR de 30dB y 16dB presentan resultados con una diferencia al teórico de 0.6μ s en todos los métodos, exceptuando el *PVAR-1* (35.4μ s y 72.4μ s, sin filtro, y 1.3μ s y 8μ s, con filtro, respectivamente) y el *PVAR-2* (1.5μ s y 4.7μ s, sin filtro, y 0.7μ s y 1.3μ s, con filtro, respectivamente). Esto es debido a que, con pulsos ideales, los métodos funcionan perfectamente y se obtienen resultados casi exactos.

CONCLUSIONES

- Con la señal ideal, como las que se han estudiado, se detectan los pulsos con cualquier método con relaciones de SNR mayores a los -5dB.
- Los métodos de correlación (*CORR* y *CORR ENV*) son pocos sensibles al ruido, presentando la máxima estabilidad en este estudio.
- Comparando los métodos de las transformadas *pvar*, parece ser que el *PVAR-2* obtiene resultados ligeramente mejores.
- El filtrado de la señal permite la mejora en todos los métodos que usan el de *UMB* para una SNR mayor a 0dB. Por el contrario, no mejora la detección en los métodos de correlación (*CORR* y *CORR ENV*).
- Sería precipitado afirmar que el mejor método es el de *CORR*, ya que faltaría realizar la prueba con señales experimentales, pero bien es cierto que en la simulación (con pulsos ideales y libres de reflexiones) da los mejores resultados, tanto en exactitud como en estabilidad.



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

- Se debe comprender que con un resultado con una diferencia al teórico mayor a $65\mu\text{s}$, supone una diferencia en distancias, mayor a 0.1m, lo que en este estudio se cumpliría en todos los métodos usando el filtro para una $SNR > -5\text{dB}$ y una $SNR > 0\text{dB}$ sin filtro.

FUTUROS ESTUDIOS

- Estudiar la estabilidad de los métodos en presencia de posibles reflexiones recibidas del rebote de los pulsos con otros elementos del telescopio e incorporar una función de transferencia de emisión-propagación-recepción más realista lo que podría desestabilizar los métodos de forma muy diferente, siendo algunos más sensibles que otros a estos aspectos.
- Finalmente, se debe realizar dicho estudio con las señales experimentales registradas en la campaña *in situ* de ORCA para seleccionar un método de detección e implementarlo en KM3NeT.

REFERENCIAS

- [1] S ADRIÁN-MARTÍNEZ; ET AL. (2016) "Letter of intent for KM3NeT 2.0" en *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, (43) 084001.
- [2] S. VIOLA; ET AL.: (2015) "Acoustic positioning system for KM3NeT" en PoS (ICRC2015)1169.
- [3] M. ARDID (2009) "Positioning system of the ANTARES neutrino telescope" en *Nucl. Inst. Meth. A* 602, 174.
- [4] PROAKIS, J.G.; MANOLAKIS, D.G. (1996) *Digital Signal Processing*. EEUU: Prentice Hall.
- [5] IVAN FELIS ENGUIX. (2017) *Tecnologías Acústicas para la Detección de Materia Oscura*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.