

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# Control Activo de Ruido mediante técnicas de Wave Field Synthesis

Tipología: Trabajo de investigación

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

Autor: **Antonio Cano Morcillo**

Tutor: **Miguel Ferrer Contreras**

**GANDIA, septiembre de 2014**

## **RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es aplicar las técnicas de Wave Field Synthesis (WFS) al Control Activo de Ruido (Active Noise Control, CAR o ANC). Se pretende generar un entorno de simulación que permita estudiar las posibilidades de los sistemas WFS, a partir de distintas geometrías y configuraciones, para obtener un efecto de control activo de ruido global, en una zona de silencio relativamente amplia, a partir de la generación de una señal de anti-ruido posicionada virtualmente en el punto donde está la fuente de ruido. Para ello, se realizará una revisión de los fundamentos teóricos del Control Activo de Ruido, así como de las técnicas de Wave Field Synthesis. Se estudiará la viabilidad de estos sistemas WFS en su aplicación a sistemas CAR, y se desarrollará un entorno de simulación que permita determinar el funcionamiento y las limitaciones de estos sistemas, partiendo de la geometría y configuración del sistema y de las características y localización de la fuente de ruido. Se pretende que este trabajo pueda servir de punto de partida para posteriores trabajos de investigación que permitan conocer mejor el funcionamiento y técnicas WFS aplicados al control activo de ruido.

Palabras clave: *Wave Field Synthesis, control activo de ruido*

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to apply the techniques of Wave Field Synthesis (WFS) into Active Noise Control (ANC). It aims to generate a simulation environment which allows to study the possibilities of WFS systems from different geometries and configurations, in order to obtaining an effect of active control over noise. All this, in a relatively wide area of silence, from the generation of one anti-noise signal virtually positioned at the point where the noise source is. In order to do this, a review of the theoretical foundations of Active Noise Control, together with the Wave Field Synthesis techniques will be carried out. WFS viability of these systems in their application to ANC systems will also be studied. Finally, on the basis of the geometry and configuration of the system, as well as the characteristics and limitations of the noise source, a simulation environment will be developed in order to determine the performance and limitations of theses systems. It is intended that this work can serve as a starting point for further research to better understanding of WFS techniques applied to active noise control.

Keywords: *Wave Field Synthesis, Active Noise Control*

# ÍNDICE

1.- Introducción y objetivos .....	5
1.1.- Introducción.....	5
1.2.- Motivación .....	6
1.3.- Objetivos .....	7
1.3.- Metodología .....	7
1.4.- Estructura del Trabajo Final de Máster .....	8
1.5.- Problemas encontrados .....	8
2.- Fundamentos teóricos .....	9
2.1.- Control Activo de Ruido.....	9
2.1.1.- Introducción al Control Activo de Ruido.....	9
2.1.2.- Limitaciones de los sistemas CAR.....	10
2.1.3.- Otras aplicaciones CAR.....	13
2.1.4.- Estrategias de control en sistemas CAR .....	14
2.2.- Wave Field Synthesis.....	14
2.2.2.- Funciones driving.....	17
2.2.3.- Limitaciones de las técnicas WFS .....	18
2.2.4.- Posibles geometrías para el array en técnicas WFS .....	21
3.- Desarrollo .....	23
3.1.- Consideraciones previas.....	23
3.2.- Código MATLAB para la simulación.....	26
3.2.1.- Simulación de fuente primaria .....	26
3.2.2.- Simulación de fuente virtual con WFS de geometría básica.....	30
3.2.3.- Simulación de fuente virtual con WFS de geometría arbitraria..	32
3.2.4.- Simulación CAR con el sistema WFS propuesto.....	33
3.3.- Simulación de diferentes configuraciones CAR empleando WFS ....	34
3.3.1.- Array lineal.....	34
3.3.2.- Segmentos separados en un array lineal .....	40
3.3.3.- Fuente elevada sobre plano de array .....	42
3.3.4.- Array rectangular cerrado .....	43
3.3.5.- Geometría en 'U'.....	44

3.3.6.- Geometría en 'L' .....	45
3.3.7.- Geometría semicircular.....	46
3.3.8.- Geometría circular .....	47
4.- Conclusiones .....	48
4.1.- Fuentes y características de la señal .....	48
4.2.- Geometrías del array.....	49
4.3.- Otras consideraciones.....	49
4.4.- Futuras líneas de investigación.....	50
5.- Referencias bibliográficas.....	51
Anexo I - Código MATLAB.....	53
Función 'sim_fuente'.....	53
Función 'sim_array_gen'.....	55
Función 'genera_sign'.....	57
Código principal 'car_wfs' .....	58

# 1.- Introducción y objetivos

## 1.1.- Introducción

La cancelación activa de ruido (CAR) consiste en la reducción del ruido acústico no deseado a partir de la generación de un campo sonoro que cancele un determinado ruido presente. Conocido el ruido, o alguna señal correlada con el mismo, es posible generar un campo en la zona donde se pretende cancelar tal que sumado al mismo lo cancele o al menos lo atenúe. Si este efecto se consigue en ciertos puntos de control, se habla de control local, mientras que si se trata de ejercer el control en todo el espacio de un recinto, se entiende como control global.

Las técnicas de síntesis de campo de ondas, o Wave Field Synthesis (WFS), permiten recrear las características espaciales de un campo sonoro, mediante un array de altavoces que envuelva la zona sobre la que se desea trabajar con una determinada distribución y características. Estas técnicas permiten una identificación precisa de la localización de la fuente recreada, con independencia de la posición del oyente o de su movimiento en el interior de la zona de trabajo.

Las aplicaciones habituales de las técnicas WFS suelen ser las de recreación espacial con fines de ocio, como evolución de los sistemas de sonido envolvente. Pero es posible su utilización en otros campos, como la cancelación activa de ruido, con la previsible ventaja de que el oyente puede moverse por el interior de una zona, no limitándose la cancelación a una ubicación puntual, como en otros sistemas habituales de cancelación activa de ruido.

En este trabajo se pretende aplicar las técnicas de Wave Field Synthesis al Control Activo de Ruido, para obtener un efecto de control activo de ruido global (en el espacio donde el sistema de WFS es capaz de funcionar como tal) a partir de la generación de una señal de anti-ruido posicionada virtualmente en la posición donde está la fuente de ruido.

## **1.2.- Motivación**

Las técnicas de control activo de ruido han sido estudiadas en profundidad en los últimos años. A pesar de ello, cuentan con importantes limitaciones, en especial en cuanto a la zona de silencio creada, que suele limitarse al entorno espacial de los puntos de monitorización para las técnicas de control local. Las técnicas WFS son adecuadas para el control activo de ruido, puesto que permiten recrear no sólo el necesario anti-ruido preciso para cancelar, o al menos reducir, la fuente de ruido original, sino que permite recrear el campo sonoro adecuado, con sus características espaciales. Ello permite ampliar la zona de silencio al interior del recinto delimitado por un array de altavoces.

La principal limitación de las técnicas WFS es el elevado coste y complejidad del sistema, pues se suelen emplear disposiciones con un elevado número de altavoces, lo que implica también un importante coste computacional, así como una gran complejidad en el ajuste del sistema.

Dado un problema concreto de cancelación activa de ruido, no hay en principio definida una geometría o disposición de los altavoces, por lo que es posible reducir el número o modificar la geometría de los mismos, a partir de unos requisitos predefinidos de cancelación de ruido.

Es deseable encontrar geometrías adecuadas de sistemas WFS para su aplicación en control activo de ruido, así como estudiar distintos casos, en función de la ubicación de la fuente de ruido, características del mismo, de los altavoces que forman el array y de su disposición. Se parte de esta necesidad para desarrollar una aplicación básica que permita el análisis de estas geometrías y configuración de sistemas WFS.

### **1.3.- Objetivos**

Se pretende desarrollar un entorno de simulación de un sistema de Wave Field Synthesis (WFS) que permita estudiar las posibilidades de estas técnicas en el Control Activo de Ruido (CAR). Se describirán las características y configuraciones de sistemas WFS que permiten una adecuada cancelación del ruido, determinándose las limitaciones de los mismos con este fin.

Por tanto, el objetivo final es proponer configuraciones apropiadas al problema del control activo de ruido, definiendo la geometría, número de elementos del array y disposición de los mismos, así como características de la señal emitida por la fuente de ruido que permitan un buen funcionamiento del sistema WFS con fines de control activo de ruido.

Junto a los objetivos principales, se señala como objetivo profundizar en el conocimiento de las técnicas de tratamiento digital de la señal, describir el estado actual de la cuestión tanto sobre técnicas CAR como de sistemas WFS, así como extraer conclusiones sobre el funcionamiento y viabilidad de estos sistemas en aplicaciones reales. Se considera también un objetivo marcar líneas futuras de investigación que, aprovechando el entorno de simulación, permitan conocer mejor el funcionamiento y técnicas WFS para su aplicación a distintos problemas de control activo de ruido.

### **1.3.- Metodología**

El trabajo comienza con un estudio teórico que permita asimilar los conceptos relacionados tanto con el control activo de ruido como con las técnicas de Wave Field Synthesis. Se pasará del estudio teórico, exponiendo sus campos de aplicación y limitaciones, al desarrollo de un código que permita, mediante simulación, hacer estimaciones de distintos casos. Se pretende obtener un código que permita simular de la manera más flexible posible distintos casos y geometrías de sistemas WFS. Los resultados obtenidos serán más cualitativos (describir distintas geometrías, problemas encontrados, ventajas de cada una, etc.) que cuantitativos (que podrían ser objeto de trabajo posterior), de la manera más visual posible, en forma de animaciones que permitan ver qué sucede en cada caso. Más allá de obtener conclusiones en cuanto a la eficiencia de las posibles configuraciones, se pretende que el sistema pueda servir de base para posteriores trabajos de simulación de técnicas WFS aplicadas al control activo de ruido.

### **1.4.- Estructura del Trabajo Final de Máster**

La estructura del trabajo se corresponde con el plan de trabajo definido inicialmente, de manera que:

- En la sección 1 se introduce el tema, y se fijan los objetivos del trabajo
- La sección 2 consta de dos partes: en la primera se tratan los fundamentos teóricos sobre el Control Activo de Ruido (CAR), en la segunda se hará una revisión de las técnicas Wave Field Synthesis (WFS) y se discutirá sobre su posible uso en sistemas CAR
- La sección 3, que corresponde al desarrollo del trabajo, tiene también dos partes: en la primera se describe el código desarrollado para simular fuentes de ruido y sintetizar las mismas mediante sistemas WFS, para generar el anti-ruido y cancelar de forma activa el mismo; con el mismo se podrá observar la variación del campo acústico en un espacio, una vez determinadas la posición de las fuentes y señales de ruido; en la segunda se estudiarán distintos casos, según la geometría del problema y la configuración del posible sistema WFS.
- En la sección 4, se resumirán las conclusiones y se analizarán los resultados sobre la eficiencia del CAR empleando sistemas WFS como los propuestos, sugiriendo posibles mejoras y alternativas, así como algunas líneas futuras de investigación.
- La sección 5 incluirá las referencias empleadas en este trabajo, tras lo que se incluirán unos anexos con el código fuente empleado.

### **1.5.- Problemas encontrados**

En el desarrollo del trabajo hay que aplicar los conocimientos sobre Tratamiento Digital de la Señal, lo que ha supuesto un reto, al poner en práctica los conocimientos teóricos que se han adquirido en distintas materias, a lo largo de todo el máster en Ingeniería Acústica. Aunque MATLAB ha facilitado el trabajo intensivo con matrices necesario en técnicas WFS, se ha encontrado cierta dificultad en el desarrollo de código para sintetizar señales mediante WFS, no encontrándose muchos ejemplos al tratarse de una técnica relativamente nueva. Los sistemas CAR se encuentran hoy día en un desarrollo avanzado, pero no se ha encontrado mucha información sobre los mismos empleando WFS, lo que ha entrañado cierta dificultad al tener que trabajar desde cero en muchos puntos.



## **2.- Fundamentos teóricos**

### **2.1.- Control Activo de Ruido**

#### **2.1.1.- Introducción al Control Activo de Ruido**

La cancelación activa de ruido (CAR), o control activo de ruido (Active Noise Cancellation, ANC), es la modificación del campo sonoro empleando transductores electroacústicos, con el fin de eliminar o al menos reducir un ruido no deseado en una zona del espacio o zona de silencio. Esto se consigue con la interferencia destructiva de dos o más frentes de onda en una zona del espacio [1], tal que provocando una o varias señales de ruido (llamado a veces anti-ruido) cancela o al menos reduce el ruido original de forma considerable en esa llamada zona de silencio.

Cuando se pretende cancelar el ruido en ciertos puntos se habla de control local, frente al control en una zona de silencio más o menos amplia, en cuyo caso se habla de control global.

Todas las teorías de CAR [2] se basan en la superposición de campos sonoros, cuyos primeros experimentos fueron realizados por L. Rayleigh (1878), donde describe "puntos de silencio" como resultado de la interferencia producida por dos diapasones sincronizados, encontrando niveles de presión máximos y mínimos entre ellos. Ello demostró que los campos sonoros interfieren de manera análoga a las ya conocidas aplicaciones ópticas.

Los orígenes del CAR como tal pueden encontrarse en Paul Lueg (Alemania, 1934), proponiendo la interferencia destructiva entre el campo de ruido (primario) y uno secundario, en oposición de fase, generado electrónicamente, para generar zonas de silencio. Harry Olson [3] demostraría que esto es posible, implementando sistemas de control activo de ruido muy básicos (1953-56), planteando aplicar este concepto a salas, conductos y auriculares. Se experimentó poco después con aplicaciones de reducción de ruido en los auriculares de los pilotos de helicópteros y aviones. Las primeras aplicaciones prácticas en cuanto a cancelación de ruido en auriculares aparecerían más tarde (A. Bose, 1978).

El desarrollo de los sistemas CAR surge a partir del desarrollo de los procesadores digitales de señal (Digital Signal Processors, DSP), que permitían el uso de filtros adaptativos, capaces de adaptar el sistema de control a los cambios presentes en el ruido que se pretende cancelar. Así en los años 80 surgen aplicaciones prácticas de reducción de ruido en conductos y protectores auditivos. En los años 90 se extiende el estudio y aplicaciones prácticas del CAR al interior de vehículos.

Todas las técnicas de cancelación activa de ruido deben considerar un transductor que capta el ruido no deseado (micrófono) y otro que genera el campo (altavoz) tal que, sumado al ruido original en la zona de silencio, minimice el ruido no deseado [4], sin alterar el resto de sonidos.

Con los métodos tradicionales de control de ruido de forma pasiva, se impide que el ruido llegue al oyente por medios mecánicos, interponiendo materiales aislantes, absorbentes, silenciadores, sistemas de amortiguación y otros entre la fuente de ruido y la zona que se pretende silenciar. Estas técnicas, aunque importantes y con una alta eficiencia en altas y medias frecuencias, tienen un alto coste, además de que suelen presentar un gran volumen y elevado peso. Esto no siempre es posible, y en algunos casos donde sí lo es, no resulta conveniente por el exceso de peso y volumen que implica. Además, cuanto más bajas son las frecuencias problemáticas, la densidad y por tanto peso de los materiales a emplear son tan altos que no resulta viable en muchos casos. Por tanto el CAR puede ser una alternativa, o incluso un complemento, a los sistemas de control de ruido pasivos.

La cancelación de ruido dependerá de las características de la zona de silencio deseada, del tipo y complejidad del ruido a cancelar, de la estrategia y algoritmo de control, así como de la configuración de las fuentes y sensores empleados en el sistema. En principio, los métodos de control activo de ruido tradicionales están limitados a ruido de baja frecuencia y espacios reducidos.

### **2.1.2.- Limitaciones de los sistemas CAR**

En el caso más simple de cancelación de ruido que proviene de una fuente (primaria) con el empleo de otra fuente (secundaria), si la fuente primaria y secundaria no alcanzan al oyente con exactamente el mismo nivel y signo opuesto (fase  $180^\circ$ ), la suma es distinta de cero. Por tanto la reducción del nivel de ruido es proporcional al error en la señal secundaria respecto a la primaria.

Para conocer la efectividad de cualquier sistema de control activo de ruido, sea cual sea la estrategia de control utilizada, es conveniente conocer por tanto el error de amplitud y fase de la señal generada por la fuente secundaria.

Para calcular este error, y suponiendo que ambas señales son idénticas a excepción de la amplitud y la fase, partimos de que la presión total se podría calcular [5] como:

$$p_t = p_1 - e^{j\varphi} \cdot p_2$$

Siendo  $p_1$  la amplitud de la señal primaria,  $p_2$  la secundaria y  $\varphi$  la diferencia de fase entre ambas. Considerando las amplitudes como reales y positivas, en el caso de cancelación completa del campo se tendría que  $\varphi=0$  y  $p_1=p_2$ . En ese caso:

$$|p_t|^2 = (p_1 - e^{j\varphi} \cdot p_2) \cdot (p_1 - e^{-j\varphi} \cdot p_2) = p_1^2 + p_2^2 - 2p_2 p_1 \cos \varphi$$

La reducción de ruido  $\Delta L$  sería:

$$\Delta L = 10 \log \left( \frac{p_1^2}{p_t^2} \right) = -10 \log \left( 1 + \frac{p_2^2}{p_1^2} - 2 \cos(\varphi) \frac{p_2}{p_1} \right)$$

Partiendo de que la diferencia de niveles es:

$$L_{dif} = L_1 - L_2 = 10 \log \left( \frac{p_1^2}{p_2^2} \right)$$

Se obtienen las curvas:

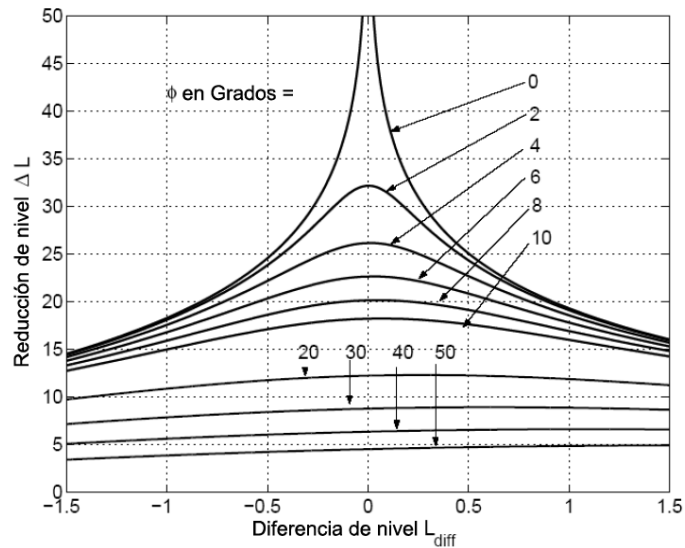


figura 1 - reducción de ruido (dB) en función de diferencias de nivel y fase

Como se aprecia, para obtener altos niveles de reducción de ruido la diferencia de nivel tiene que ser mínima: para una reducción de más de 25 dB es necesario que la diferencia de nivel sea menor que 0,5 dB, y la de fase menor a 4°. Esto muestra una limitación importante en los sistemas de control activo de ruido, pues la precisión requerida para generar el campo secundario es a veces inviable en aplicaciones prácticas.

En cuanto al tamaño de la zona de silencio, si se considera el caso de dos ondas que se propagan perpendicularmente entre sí, si el punto donde se desea cancelar totalmente el ruido se hace coincidir con el origen de coordenadas, y las ondas inciden con un ángulo de 45° respecto al eje  $y$ , se puede obtener el campo sonoro total como:

$$|p_t| = -2jp_0 \text{sen}(kx \cdot \cos(\varphi)) e^{-jky \cdot \text{sen}(\varphi)}$$

$$|p_t|^2 = 4p_0^2 \text{sen}^2(kx \cdot \cos(\varphi))$$

La diferencia de nivel se podría calcular como:

$$\Delta L = 10 \log \left| \frac{p_0}{p_t} \right|^2 = -10 \log(4 \text{sen}^2(kx \cdot \cos(\varphi)))$$

A partir de:

$$4\text{sen}^2(kx \cdot \cos(\varphi)) = 2^{-2N}$$

$$\text{sen}(kx \cdot \cos(\varphi)) = 2^{-(N+1)}$$

Aproximando la función seno por el argumento (si  $N \geq 1$ ):

$$kx \cdot \cos(\varphi) = 2^{-(N+1)}$$

Si  $\varphi=45$ , para una reducción de nivel que sea múltiplo de 6 dB, donde  $\Delta L=6 \cdot N$  (dB), se obtiene:

$$\frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{0,45}{2^{N+1}}$$

Así, para una reducción de 6 dB, la zona de silencio sería 0,1125 el tamaño de la longitud de onda. Para mayores niveles de reducción la zona de silencio pasa a ser significativamente más pequeña. Por ejemplo, para una reducción de 20 dB es necesaria una precisión de amplitud por debajo de 1 dB, y menor de 6° de diferencia de fase. Se puede concluir que los sistemas CAR serían viables para zonas de silencio muy reducidas y frecuencias bajas.

### 2.1.3.- Otras aplicaciones CAR

Los sistemas CAR se utilizaron inicialmente para cancelar ruido en el interior de conductos de aire o de otros fluidos [6]. Partiendo de la base de que los sistemas activos permiten reflejar y absorber ondas sonoras, se puede reducir el ruido en un conducto con aire en el que se instala un altavoz lateralmente como fuente secundaria, complementándose el sistema con una segunda fuente secundaria, que permite una casi total absorción de la energía de la fuente primaria.

Otra aplicación de los sistemas CAR es la estabilización activa de vibraciones autoexcitadas, como las generadas por instrumentos musicales o elementos sometidos a flujos de aire (alas de un avión, puentes, etc.). En estos casos es posible reducir e incluso eliminar la vibración con sistemas activos.

### **2.1.4.- Estrategias de control en sistemas CAR**

Las estrategias de control empleadas en los sistemas CAR dependen de la naturaleza del ruido a controlar. Básicamente hay estrategias de configuración feedforward (en adelante) y feedback (realimentadas). Por lo general se emplean filtros adaptativos, cuya misión es minimizar algún parámetro (como, por ejemplo, el valor cuadrático medio) de la señal monitorizada o de error. En este tipo de filtros se utilizan algoritmos recursivos, lo que hace posible que funcionen en entornos donde no se conocen en detalle las características del ruido a controlar.

Uno de los algoritmos adaptativos empleados en el CAR es el algoritmo LMS (Least Mean Squares) [7], que consiste en dos procesos: un proceso adaptable, por el cual se ajusta un conjunto de pesos de un filtro adaptativo, y el filtrado, que produce una estimación de la respuesta deseada, y permite calcular el error de estimación por la comparación de la salida con el valor actual de la respuesta. El error de estimación realimenta el proceso de adaptación.

### **2.2.- Wave Field Synthesis**

Las técnicas Wave Field Synthesis (WFS, síntesis de campo sonoro) intentan reproducir los frentes de onda en una zona del espacio, tal y como lo haría una fuente en una posición arbitraria. Se intenta por tanto sintetizar el campo sonoro de manera fiel, dentro de una zona donde el oyente puede moverse y desplazarse sin perder la capacidad para localizar la fuente original. La base de las técnicas WFS está en el Principio de Huygens [8]: cada punto de un frente de ondas puede considerarse como una nueva fuente secundaria.

El campo de todas las fuentes secundarias equivale al campo original. Para poder sintetizar una señal, la superficie de control debe estar cerrada. Si no lo está, la síntesis no será perfecta, si bien en algunos casos puede ser suficiente. La forma de recrear esas fuentes secundarias puede ser mediante altavoces.

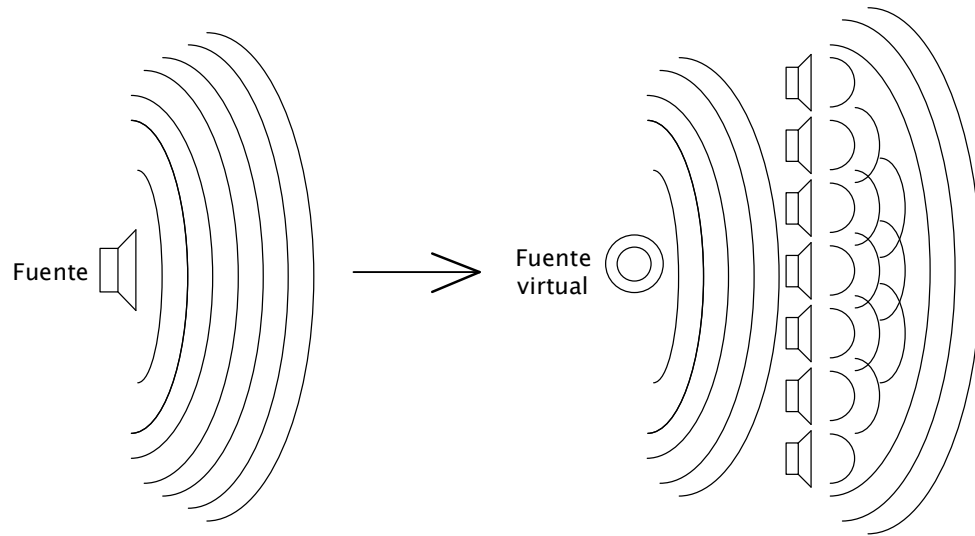


figura 2 - síntesis WFS

Un precedente de los sistemas WFS es el concepto de "cortina acústica" [Snow, 1953]: si frente a un escenario se coloca una cortina con multitud de micrófonos, el registro de los mismos nos permitiría reconstruir el sonido que se propaga hasta el patio de butacas. Si se coloca ahora otra cortina con multitud de altavoces (tantos como micrófonos en el caso anterior) y reproducimos lo registrado antes, obtendríamos la escena sonora original con todas sus características espaciales.

Más tarde, los conceptos en que se basan los sistemas WFS fueron definidos por Berkhout entre 1987 [9] y 1993 [10], empleándose inicialmente términos como 'holografía acústica' [11], al reconstruir fielmente el campo sonoro original dentro de un volumen.

Para aplicar las técnicas WFS es necesario contar con un array de un elevado número de altavoces, lo que a su vez requiere una carga enorme de procesado para alimentar cada altavoz por un canal independiente. Cada altavoz requiere, aparte del procesado, un convertidor digital-analógico y un amplificador, lo que encarece enormemente el sistema. Idealmente se parte de un array de altavoces en tres dimensiones que encierra todo el volumen sobre el que se desea trabajar, pero se suele limitar a un array lineal en el plano del oyente.

Los principios del CAR empleando WFS se basan en la ecuación Kirchhoff-Helmholtz: si se conoce el campo acústico encerrado en un volumen  $V$ , generado por una fuente sonora externa a la superficie  $S$  que encierra el volumen  $V$ , se puede recrear el campo original empleando una distribución de fuentes de tipo monopolo sobre la superficie  $S$ :

$$P(r, w) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left[ P(r_n, w) \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{-jk|r-r_n|}}{|r-r_n|} \right) - \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{-jk|r-r_n|}}{|r-r_n|} \right) \right] dS$$

Si en vez de una superficie S se tiene un plano que separa el área de reproducción del área en la que está la fuente sonora original, la ecuación se puede reducir a dos ecuaciones distintas, denominadas integrales de Rayleigh I [12] y II [10]:

$$P(r, w) = \rho c \frac{jk}{2\pi} \iint_S \left[ v_n(r_n, w) \frac{e^{-jk|r-r_n|}}{|r-r_n|} \right] dx \cdot dy$$

$$P(r, w) = \frac{jk}{2\pi} \iint_S \left[ P(r_n, w) \frac{1 + jk|r-r_n|}{jk|r-r_n|} \cos \phi \frac{e^{-jk|r-r_n|}}{|r-r_n|} \right] dx \cdot dy$$

La presión en un punto del interior del volumen, a partir de la integral de Rayleigh I, se puede obtener como combinación lineal de fuentes secundarias (monopolos), a partir de la velocidad de propagación en el plano S, mientras que es posible utilizar altavoces actuando como dipolos con la integral de Rayleigh II, empleando para ello la presión en el plano S.

La integral de Rayleigh II se puede simplificar si consideramos el caso de campo lejano  $k \cdot |r-r_n| \gg 1$ , obteniéndose:

$$P(r, w) = \frac{jk}{2\pi} \sum_{n=1}^N P(r_n, w) \cos \phi_n \frac{e^{-jk|r-r_n|}}{|r-r_n|} \Delta x \Delta y$$

Si en lugar de trabajar en tres dimensiones se reduce el sistema a un plano de reproducción, en forma de una única línea de fuentes secundarias, tal y como se planteaba con el fin de reducir coste y simplificar el sistema, la ecuación queda:

$$P(r, w) = \frac{jk}{2\pi} \sum_{n=1}^N P(r_n, w) \cos \phi_n \frac{e^{-jk|r-r_n|}}{|r-r_n|} \Delta x$$



### 2.2.2.- Funciones driving

Para calcular la señal que debe reproducir cada altavoz para sintetizar el campo sonoro generado por una fuente primaria, hay que utilizar una función, denominada driving function, que depende de la geometría del sistema de altavoces y de la posición de la fuente primaria, denominada fuente virtual cuando es reconstruida con las técnicas WFS.

Dada la siguiente disposición:

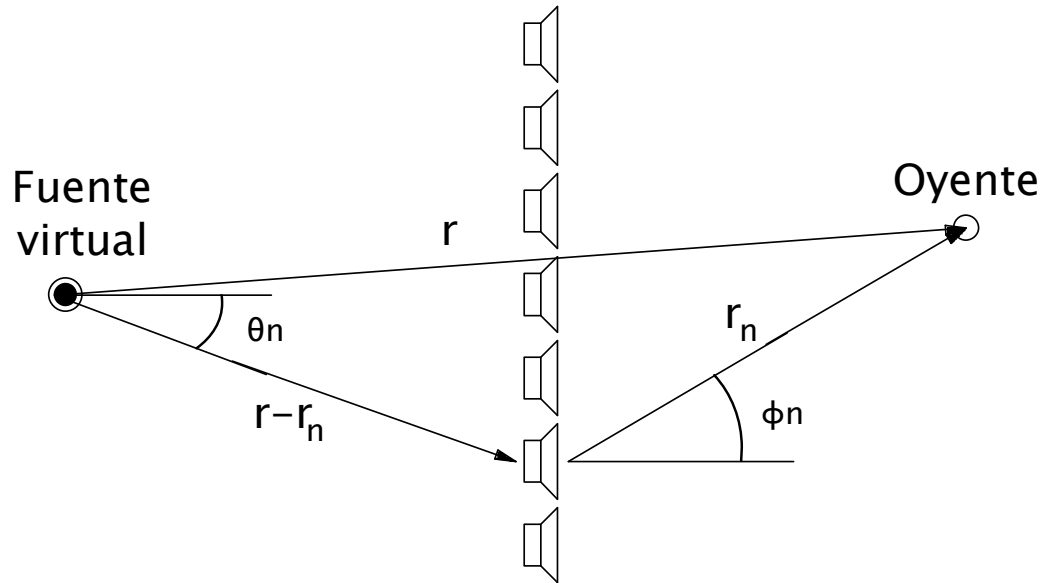


figura 3 - geometría técnica WFS

Se puede determinar el campo sonoro que generaría una fuente virtual en cualquier punto, considerando la fuente como puntual y omnidireccional, obteniéndose, para cada punto  $r$ :

$$P(r, w) = S(w) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

Siendo  $S(w)$  el espectro de la señal generada por la fuente virtual, el término  $e^{-jkr}$  del numerador el retardo debido al camino  $r_n$  y el denominador  $r$  la atenuación producida por divergencia esférica.

Las funciones driving que sirven para generar la señal que reproducirá cada altavoz son proporcionales a la presión en la superficie S, resultando:

$$Q(r_n, w) = A_n P(r_n, w)$$

Combinando con la anterior resulta:

$$Q(r_n, w) = A_n S(w) \frac{e^{-jkr_n}}{r_n}$$

Se deduce por tanto que las señales generadas en cada altavoz se obtienen simplemente modificando la amplitud de la señal original y retardándola [13], tal y como lo haría la señal original hasta llegar al punto de reproducción de cada altavoz.

En 2008 Spors [14] introdujo algunas modificaciones en la forma de obtener las funciones driving, ampliándolas para el caso 3D y con algunas modificaciones para casos 2D con distribuciones arbitrarias, si bien en los casos que se verán aquí, formados por unión de segmentos de arrays lineales, se obtienen prácticamente los mismos resultados, siempre que se cumpla la aproximación de campo lejano.

### 2.2.3.- Limitaciones de las técnicas WFS

El número de altavoces necesario para cubrir una zona sería, teóricamente, infinito [12]. La realidad es que deben estar separadas una distancia mínima, al menos la del propio tamaño del altavoz. Además se ha considerado al altavoz como una fuente omnidireccional, lo que no es realista. Ni siquiera es igual de direccional a todas las frecuencias, por lo que especialmente en altas frecuencias no podemos considerarlo una buena aproximación. Es posible corregir el efecto, si bien es más práctico trabajar por debajo de las frecuencias en las cuales el altavoz se comporta más o menos de manera omnidireccional.

Al tratarse de un número finito de altavoces, con una separación, se produce también difracción: no se trata de infinitas fuentes secundarias, habiendo zonas de sombra. En los extremos del array por tanto habrá difracción, que impedirá generar el campo que se quiere recrear en esa zona. Este fenómeno se puede minimizar aplicando una ventana a las señales de excitación de cada fuente secundaria (tapering), dando menos peso a los altavoces cercanos al extremo del array. Como contrapartida, la zona efectiva de escucha se reduce.

En teoría haría falta envolver el volumen por completo con altavoces, pero se ha comentado que por cuestiones prácticas se suele limitar la implementación a un array lineal que rodea una superficie, que coincide con el plano de escucha, limitándose el problema por tanto a dos dimensiones. Por tanto al situar al oyente fuera del plano horizontal delimitado por los altavoces habrá errores de localización de las fuentes, y si la fuente a sintetizar está fuera del plano (elevada o bajo el mismo) no se puede recrear en principio esa elevación fuera del plano.

Un array lineal genera ondas cilíndricas en lugar de esféricas, lo que da una atenuación diferente con la distancia, provocando un error que varía con la distancia de la fuente virtual al array.

Al implementar de forma práctica un sistema WFS, la separación entre altavoces produce un aliasing [15] espacial en el campo sintetizado al superar una determinada frecuencia. Esta frecuencia de aliasing depende de la separación entre altavoces, resultando [16]:

$$f_a = \frac{c}{2 \cdot \Delta x \cdot \cos \varphi_{\max}}$$

Donde  $\Delta x$  es la separación entre centro de altavoces y  $\varphi_{\max}$  el ángulo de incidencia máximo. Debido a ello, se produce una alteración en la forma del frente de onda, lo que puede dificultar la localización de fuentes con gran contenido en altas frecuencias. Se produce también una coloración debido al filtrado peine que se realiza, percibiéndose una modulación en altas frecuencias al moverse dentro de la zona de escucha.

Este problema solo se puede mejorar empleando altavoces de diferente tecnología, como los de modos distribuidos (DML, Distributed Mode Loudspeakers), incrementando el número de tweeters y reduciendo su separación en el array, o reducir el ancho de banda espacial de la señal a sintetizar, realizando un filtrado que requiere gran potencia de cálculo.

Una alternativa planteada más recientemente es la técnica OPSI, basada en los métodos de imagen phantom estéreo [17]. Con esta técnica se divide la señal de cada fuente en dos bandas, siendo procesadas las de baja frecuencia mediante técnicas WFS, y las de alta frecuencia mediante una imagen phantom clásica.

Un problema común es el de las fuentes próximas al array, relacionado con el error de cálculo de la amplitud de las señales driving de los altavoces cercanos a la fuente virtual. Para corregir este problema se puede limitar la amplitud en los altavoces cercanos a la fuente [17].

Otro problema es el llamado retardo fraccionario: al obtener el retardo a generar en cada altavoz, es posible que haya errores de redondeo, que no es despreciable. El retardo será necesariamente múltiplo de un número entero de muestras, dependiendo por tanto de la frecuencia de muestreo. El efecto es el mismo que si se desplaza el altavoz unos pocos milímetros, lo que genera un error que es perceptible sobre todo con fuentes en movimiento. Es conveniente reducir al máximo los errores, escogiendo de forma adecuada el sistema de interpolación adecuado al realizar los cálculos del retardo.

Un problema menor es el de las fuentes focalizadas, que consiste en recrear fuentes virtuales en el interior de la zona de escucha, situando la fuente entre los altavoces y el oyente. El principal problema es que el retardo debería ser negativo, siendo un sistema no causal. La solución es incluir un retardo global en la recreación, que permita sintetizar una señal en cualquier punto de la zona de escucha antes que si se tratara de la generada por una fuente en la zona del array o tras él. La zona recreada solamente será correcta tras el punto donde se sitúa la fuente virtual, creándose un área de reproducción correcta limitada por un determinado ángulo sobre esa posición de la fuente virtual.

A la hora de recrear una escena real, es posible que alguna fuente a recrear esté en movimiento, lo que se traduciría en una serie de problemas, como sonidos entrecortados por los cálculos sucesivos para cada nueva función driving, modulaciones en amplitud debido a que la ganancia va cambiando con cada nuevo cálculo, y cálculos incorrectos de modulación en frecuencia debido al efecto Doppler. La solución a estos problemas puede ser más o menos compleja, si bien en este trabajo se considerarán solamente fuentes estáticas.

### 2.2.4.- Posibles geometrías para el array en técnicas WFS

En principio el array necesario puede tener una disposición arbitraria, siempre que sea cerrada. Si se considera que las fuentes virtuales tendrán una posición dentro de una determinada zona del espacio, no es necesario que el array sea cerrado, pues no sería necesario activar altavoces que estén en oposición al frente de onda a sintetizar.

Esto puede servir tanto para activar solo los altavoces necesarios, en el caso de una disposición geométrica cerrada del array, o bien para considerar geometrías abiertas para problemas concretos en los que la fuente virtual no se sitúe en todos los posibles puntos del plano de trabajo.

Una alternativa es considerar una línea perpendicular al segmento que une la fuente virtual a recrear con el centro del array: todos los altavoces que estén en el mismo semiplano deben generar la señal driving correspondiente, desactivando el resto:

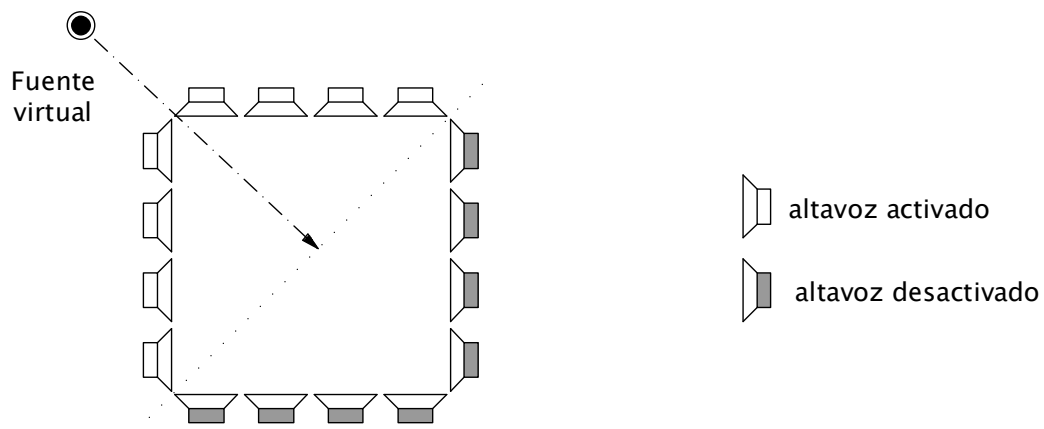


figura 4 - elementos activos e inactivos en síntesis WFS

El problema es que en muchos casos hay altavoces radiando en sentido contrario al avance del frente de onda. Esta técnica se puede mejorar considerando que los altavoces que tengan la fuente frente a ellos no deben radiar.

En geometrías donde hay pequeños grupos de altavoces en segmentos lineales, como los que se considerarán en la aplicación práctica de este Trabajo Final de Máster, es sencillo comprobar en uno sólo de los altavoces de cada segmento si la fuente primaria está delante o detrás del mismo, reduciendo el cálculo al número de segmentos, en lugar de al número de altavoces del array.

Otra técnica empleada es la de intensidad, que concluye que aquellos altavoces cuyo ángulo formado entre el vector intensidad (fuente virtual-altavoz) y la normal sea agudo deben ser activados. En el caso de fuentes focalizadas (dentro de la zona de escucha) hay diferentes variantes para definir este ángulo.

La activación o no de los altavoces de una geometría cerrada ayudaría a decidir cuándo se puede emplear una geometría abierta, lo que será objeto de simulación en una sección posterior.

Es importante considerar el ajuste de la ventana que se mencionó en geometrías abiertas, debe variar cuando no se activen todos los altavoces del array, incluso se debe incluir en geometrías cerradas cuando no se activen todos los altavoces.

### **3.- Desarrollo**

El objetivo es, por tanto, desarrollar un entorno de simulación para estudiar las posibilidades de un sistema Wave Field Synthesis (WFS) aplicado a sistemas de Control Activo de Ruido (CAR), permitiendo un control activo de ruido global, aplicado a zonas de silencio amplias.

Se determinarán las limitaciones de los sistemas de los sistemas WFS en este campo de aplicación, así como, tras simular diversos casos, proponer configuraciones apropiadas, en cuanto a la geometría y elementos del array, características de la fuente de ruido, que permitan un uso eficiente de estas técnicas en aplicaciones CAR. No se pretende obtener resultados cuantitativos, sino más bien cualitativos, en cuanto a distintas geometrías y casos concretos de localización de fuentes de ruido y zonas de silencio creadas. Se pretende por tanto que este trabajo pueda servir de base para futuras aplicaciones de CAR mediante WFS.

Para ello se utilizará el entorno MATLAB, desarrollando un código que permita la simulación de la síntesis WFS y cancelación de ruido en cualquier posición del espacio, permitiendo distintas geometrías y ajustes del sistema, así como cualquier tipo de señal de ruido.

El trabajo consta, por tanto, de dos partes: en una primera se desarrollará el código MATLAB necesario para realizar la simulación de un sistema WFS que permita generar cualquier señal a partir de una fuente virtual; en la segunda parte, se considerarán diferentes geometrías y situaciones de posición de la fuente, características del ruido, etc., de lo que se extraerán importantes conclusiones a la hora de definir y ajustar un sistema WFS con fin de cancelar ruido de forma activa.

#### ***3.1.- Consideraciones previas***

Se simulará visualmente el resultado de sintetizar el anti-ruido que permita cancelar ruido procedente de una fuente, situada en una posición arbitraria, con un sistema WFS, definiendo su geometría de la manera más flexible posible. Se partirá de una zona de trabajo, cuyas dimensiones podrán ser definidas en cada caso, en el interior o próxima a un array, que no tiene por qué ser cerrado, que será la zona de silencio a considerar en el sistema CAR.

La visualización de la simulación podrá limitarse a esta zona, o podrá incluir una zona exterior, que abarque la posición de la fuente virtual, para un mejor análisis de la situación, al comparar el campo generado (ruido) por la fuente virtual, y el campo en el interior de la zona de silencio.

La posición de la fuente de ruido podrá ser definida tanto en el interior como en el exterior del array, si bien en aplicaciones prácticas solo tendría sentido trabajar con posiciones exteriores. En cualquier caso las técnicas WFS permiten que una fuente esté en el interior de la zona de escucha, por lo que se contemplará también este caso.

Se considerarán dos casos: la fuente de ruido podrá estar en el mismo plano que el array, lo que se supone es más efectivo, y la fuente será desplazada también en la vertical, pudiendo elevarse para ver el posible efecto de cancelación. Es previsible que, dado los niveles de precisión en la amplitud y fase del campo a generar, no sea posible conseguir una zona de silencio muy amplia en este caso.

El sistema WFS será definido como fuentes omnidireccionales, con disposición arbitraria: ello permitirá considerar la geometría del array de una manera muy flexible. Como es habitual que las agrupaciones de altavoces se hagan en pequeños segmentos, se procederá aquí de la misma manera: el array lineal será definido por distintos segmentos, cada uno de ellos formado por un array de  $n$  altavoces dispuestos en línea.

Para generar formas curvas, se utilizarán segmentos con pocos altavoces dispuestos de la manera que se considere. Aunque esto tiene sus problemas para definir curvas, resulta práctico para geometrías en U, en V, rectangulares, etc., que son muy habituales.

Se considera la aproximación de altavoz como fuente omnidireccional y puntual: aparte de que esto no es del todo cierto, especialmente en altas frecuencias, puede considerarse una aproximación lo suficientemente fiel para los objetivos del trabajo. Esta aproximación tiene sentido en el interior del array, pero por supuesto genera errores de simulación en el exterior del mismo, que no se considerarán, puesto que el objetivo es el estudio de las zonas de silencio en el interior del array.

La simulación incluirá una animación en 2D, con vista en planta, en la que se podrá definir el tiempo de simulación. Por cuestiones prácticas se fijará el tiempo en unos cuantos ciclos (en caso de señales periódicas) de la señal de ruido.



El número de fotogramas (frames) podrá ser definido también, independientemente del tiempo de simulación. Por tanto habrá una expansión del tiempo a simular, que permita analizar con detalle las distintas situaciones. Por ejemplo se pueden considerar 5 ms de simulación, que pueden ser visualizados en 60 fotogramas, lo que daría un tiempo de simulación de 2 segundos a 30 fotogramas por segundo.

Se podrá utilizar como fuente de ruido cualquier señal, tanto de banda ancha como de tonos puros a distintas frecuencias, otras señales periódicas y cualquier otro tipo de señal arbitraria.

Se prestará especial atención a los previsible problemas que surgirán como resultado de utilizar técnicas WFS para la cancelación activa de ruido, en especial el aliasing espacial, efectos de borde y errores de amplitud y fase.

La aproximación empleada en la síntesis WFS será la considerada en apartados anteriores, en cada elemento del array:

$$Q(r, w) = A_n S(w) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

Esto equivale a considerar, en cada altavoz, una atenuación y un retardo, que será aplicado para generar la señal equivalente a la que generaría la fuente virtual en ese punto. Como primera aproximación no se usarán funciones tapering en los contornos abiertos, si bien en el interior de la zona de silencio se considera que la simulación es razonablemente precisa.

Para su implementación, conocida la distancia de la fuente primaria a cada elemento del array, se generará un retardo, introduciendo ceros en el vector de la señal a reproducir en cada uno de ellos, con la ganancia conveniente ajustada. Como se ha comentado, ello provocará errores de fase que no serán despreciables, debiendo tenerse esto en cuenta para posibles simulaciones posteriores.

## **3.2- Código MATLAB para la simulación**

### **3.2.1.- Simulación de fuente primaria**

Como primer paso, es conveniente simular la propagación de una fuente de ruido, definida en cualquier punto del espacio, con las características deseadas. Como se planteaba en los objetivos de este trabajo, la simulación permitirá visualizar una animación del instante de tiempo que se desee, expandiendo ese periodo en el tiempo que consideremos conveniente para el análisis de cada caso.

Una primera aproximación será la propagación de una fuente omnidireccional puntual y periódica, en su caso más simple un tono puro a una frecuencia dada. A partir de la señal almacenada en el vector correspondiente, generaremos un array en todo el espacio con la presión asignada a cada punto, originalmente cero, y que, a partir de la velocidad de propagación definida, irá recalculándose, teniendo en cuenta solamente la atenuación por divergencia esférica. El código puede verse en el anexo I.

Es posible definir todos los parámetros necesarios para la posterior simulación del sistema WFS, como velocidad de propagación, tiempo a representar en la animación, incremento del tiempo en cada fotograma de la animación, y frecuencia de muestreo.

Aunque es posible utilizar en 'sign\_orig' cualquier señal, tal y como hemos dicho es conveniente comenzar con un tono puro a la frecuencia deseada; para ello, y para su uso en distintas simulaciones, se puede utilizar la función 'genera\_sign' (anexo I). Este sencillo código permite generar señales periódicas con distintas formas de onda, o bien ruido blanco. Partiremos del siguiente caso:

- señal sinusoidal, frecuencia = 100 Hz
- área de trabajo (visible en la simulación) de 600 x 200 cm
- fuente situada en el centro de la zona de trabajo.
- velocidad de propagación = 343 m/s
- frecuencia de muestreo = 44,1 KHz
- tiempo de simulación = 40 ms
- fotogramas generados (frames) = 75 (se muestra el último)
- 25 fotogramas por segundo

En la simulación podríamos apreciar 4 ciclos completos de la señal (10 ms), en una animación que dura 3 segundos. Todos los tiempos son ajustables en el código, desde el tiempo a representar, frames por segundo, frames total de la animación, etc. La imagen (figura 1) muestra la simulación, en planta:

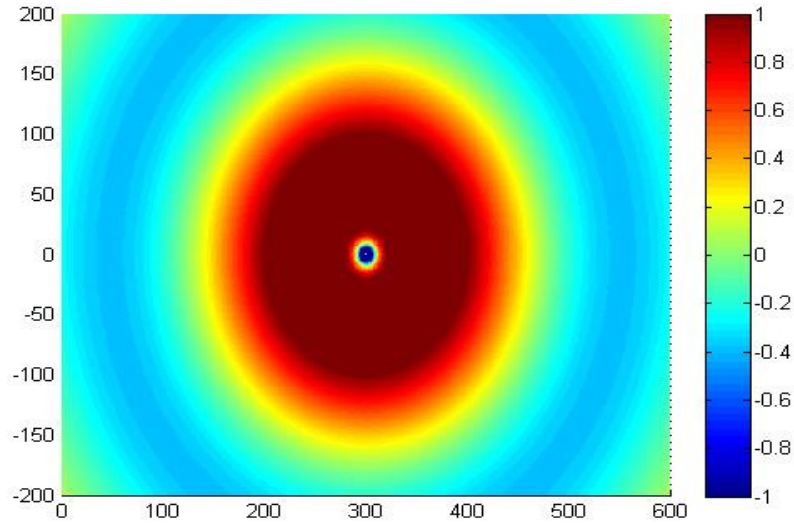


figura 5 - simulación de fuente como tono puro

Si desplazamos la señal fuera de la zona de trabajo ( $X=-300$ ,  $Y=-300$ ), mantenemos el resto de ajustes y subimos la frecuencia a 400 Hz, obtenemos (en adelante se eliminará la barra de color para referencia de niveles):

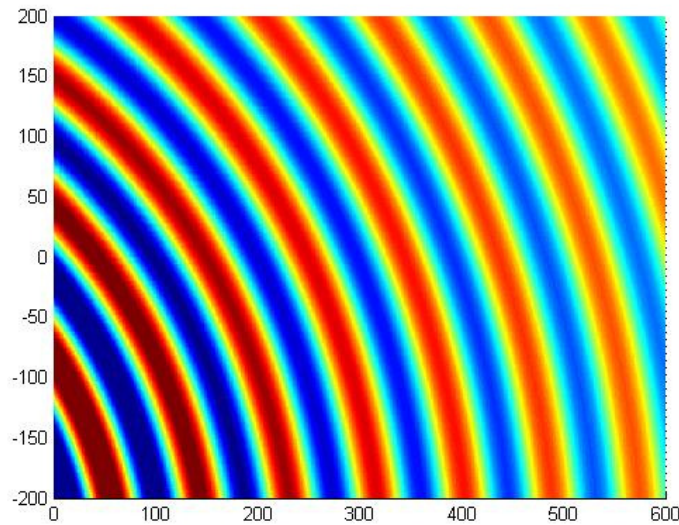


figura 6 - fuente desplazada

Se puede apreciar como el frente de ondas se aplatana al alejar la fuente de la zona de trabajo, como cabe esperar. Esto es importante porque lo que se pretende es sintetizar el campo sonoro dentro de una zona de silencio de la manera más fiel posible, para conseguir la cancelación en toda esa zona, en lugar de en un único punto en el espacio.

Lo interesante es poder utilizar cualquier forma de onda para la señal, con el fin de poder simular cualquier fuente de ruido. Como ejemplo, para comprobar el buen funcionamiento del sistema, si se mantiene la última ubicación de la fuente, se fija la frecuencia a 200 Hz y la señal generada es de tipo diente de sierra, se obtiene:

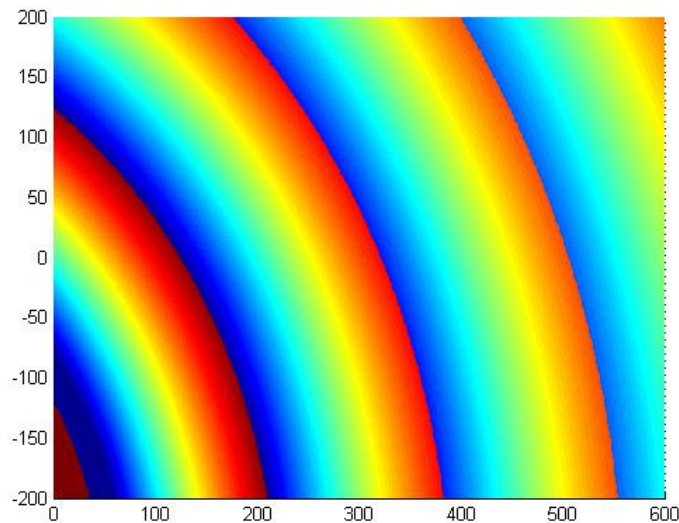


figura 7 - diente de sierra, fuente desplazada

Puede verse cómo se pasa del mínimo (azul) al máximo (rojo) de forma brusca, descendiendo después progresivamente, como corresponde a la forma de onda utilizada. En caso de una señal de ruido blanco, manteniendo la ubicación de la fuente, se tendría:

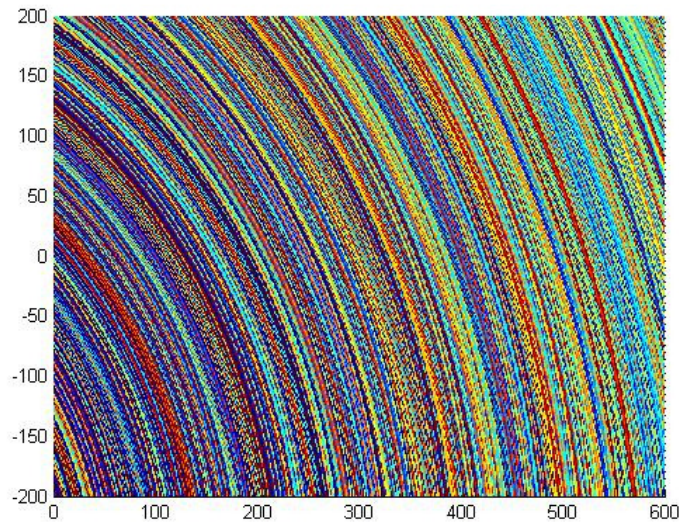


figura 8 - ruido blanco, fuente desplazada

Un caso que nos puede servir para estimar visualmente los errores de fase es la forma de onda cuadrada. En la figura, se desplaza a la zona superior la ubicación de la fuente, manteniendo su posición en el eje X:

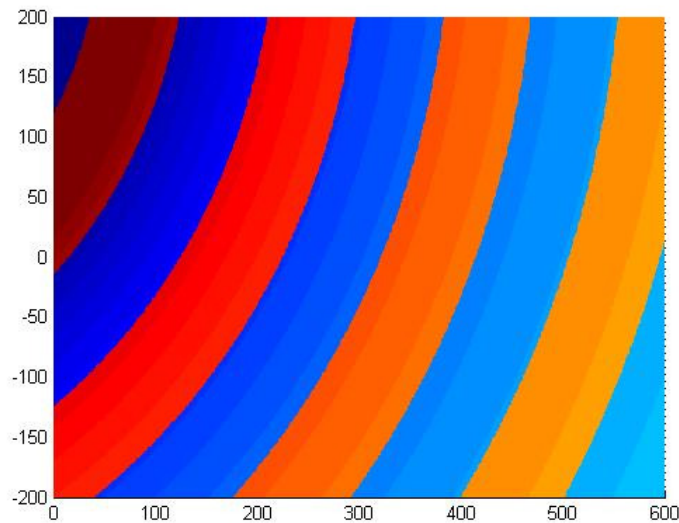


figura 9 - señal cuadrada, fuente desplazada

Se simulará de esta manera la propagación de una señal de ruido con las características deseadas, ubicada arbitrariamente en el espacio, y nos servirá para estimar la atenuación y fase inicial en la función driving del sistema WFS.

### 3.2.2.- Simulación de fuente virtual con WFS de geometría básica

Para simular una fuente virtual en la misma posición que la anterior, sintetizada con técnicas WFS, se parte primero de la simulación de un segmento de un array lineal, que será utilizado como bloque elemental a la hora de definir una geometría arbitraria. Para ello, es preciso definir:

- origen (x,y) del extremo del segmento de array
- ángulo del segmento de array, considerado sobre la vertical
- separación entre los elementos del array
- número de altavoces en el array

Por supuesto, como se mencionó antes es preciso definir otros parámetros, como tiempo a representar, intervalo de tiempo simulado en cada fotograma de la simulación, velocidad de propagación en el aire, etc. El código propuesto puede verse en el anexo I.

Se puede ver que, tras algunos ajustes iniciales, en los que se define la posición en coordenadas cartesianas de cada elemento del array, se calcula el retardo inicial, que es el tiempo que tarda en alcanzar el frente de ondas a cada uno de los elementos del array desde la fuente virtual.

A partir de ese retardo, y tras ajustar la atenuación de la forma adecuada, se generan los retardos necesarios de la señal asociada a cada elemento del array, para que cada uno de ellos reproduzca cuando el frente de ondas de la señal producida por la fuente virtual los alcance.

Tras ello, cada elemento del array pasa a ser una fuente secundaria y radiará de la misma forma que la fuente primaria lo haría, considerando la amplitud y fase inicial en cada uno de ellos.

Como la señal total será la superposición de todas ellas, por tanto la suma, sólo hay que definir, en el espacio de trabajo, la suma de cada una de las contribuciones de cada elemento del array.

Para comprobar su funcionamiento, se muestra a continuación (figura 6) un fotograma de la simulación de la fuente primaria, sintetizada por WFS representada con las siguientes características:

- señal cuadrada, frecuencia = 200 Hz (caso similar a fig. 5)
- área de trabajo (visible en la simulación) de 600 x 200 cm
- velocidad de propagación = 343 m/s
- frecuencia de muestreo = 44,1 KHz
- tiempo de simulación = 40 ms
- fotogramas generados (frames) = 75 (se muestra el último)
- 25 fotogramas por segundo
- fuente virtual en la posición X=-300, Y=300 (similar a figura 5)
- array situado en el límite de la zona izquierda de la zona de trabajo
- 19 altavoces con una separación de 20 cm entre sí

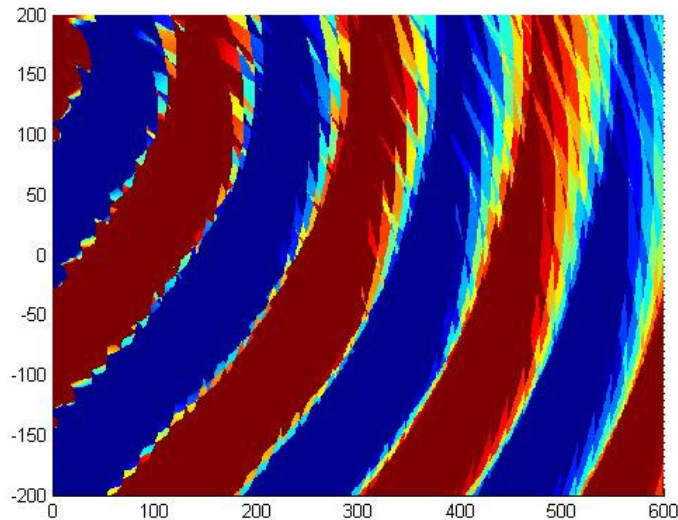


figura 10 - array generando señal de la fig. 5

Puede observarse claramente el problema del aliasing espacial, debido a que se intenta generar una señal con alto contenido en alta frecuencia (señal cuadrada) que como indica la teoría WFS y como se comprobó experimentalmente, no permite su uso al generar este tipo de problemas. La señal generada es la anterior, invertida, porque el código ya la genera como anti-ruido, como se verá en un apartado posterior. Si en lugar de generar una onda cuadrada se genera, con las mismas características, una señal sinusoidal, se obtiene una reconstrucción más fiel a la señal original:



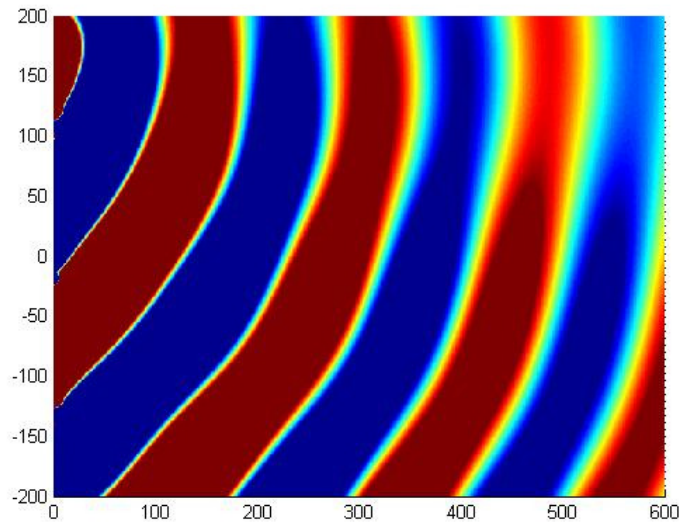


figura 11 - array reconstruyendo señal sinusoidal

Con sus limitaciones y posibles mejoras, este sistema reconstruye en la zona deseada un sistema WFS, considerando los altavoces fuentes omnidireccionales (como aproximación suficientemente válida en el interior de un array cerrado), lo que ayudará tanto a sintetizar diferentes señales de prueba como a estimar la posible cancelación de ruido según las características geométricas del array, las características de la señal y el ajuste del sistema.

### 3.2.3.- Simulación de fuente virtual con WFS de geometría arbitraria

Si se desea poder definir un array con cualquier geometría, se pueden unir tantos segmentos como se deseen, cada uno de ellos con el número de altavoces que se considere oportuno. Así, se trata solamente de superponer diferentes arrays, lo que se propone con el código MATLAB propuesto en el anexo I. En cada segmento de array es posible fijar el origen del mismo, la separación entre altavoces y el número de los mismos, así como el ángulo que adopta la disposición.

Si generamos un array en L, formado por dos segmentos, ignorando que la zona exterior al array (zona superior izquierda) no muestra una reconstrucción realista (pues los altavoces no son omnidireccionales), se obtiene un sistema con las siguientes características, mostrándose a continuación un fotograma de la animación obtenida:



- señal sinusoidal, frecuencia = 200 Hz
- mismos ajustes del sistema que en el caso anterior
- fuente virtual en la posición  $X=-300$ ,  $Y=300$  (similar a figura 5)
- dos segmentos de array situados en:
  - array 1: origen:  $X=100$ ,  $Y=-100$ , ángulo =  $0^\circ$  sobre la vertical
  - array 2: origen:  $X=100$ ,  $Y=100$ , ángulo =  $-90^\circ$  sobre la vertical
- 11 altavoces por array con una separación de 20 cm entre sí

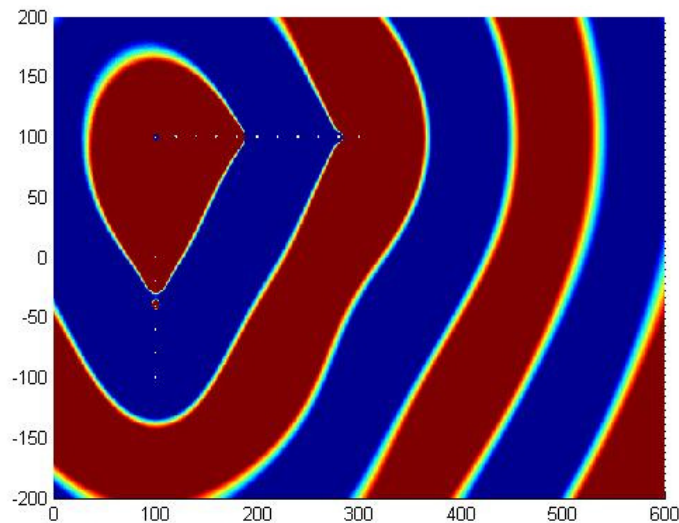


figura 12 - doble array en L

Como puede verse, no hay limitación en cuanto a la geometría a considerar, considerándose un código lo suficientemente genérico como se planteaba en los objetivos del trabajo.

### 3.2.4.- Simulación CAR con el sistema WFS propuesto

Para poder simular el control activo de ruido (CAR) empleando técnicas Wave Field Synthesis (WFS) con la configuración propuesta, sólo hay que sintetizar el campo de una fuente virtual con signo opuesto a la señal original, y superponer el campo sintetizado al campo original producido por la señal producida por la fuente primaria, que será el ruido a cancelar.

Uniendo los bloques vistos hasta ahora, se propone el código que integra tanto la simulación de la propagación de la señal de ruido, como la síntesis mediante WFS del anti-ruido para su cancelación, disponible en el anexo I.

Con este código, se estudiarán diversos casos en cuanto a geometría, localización de la fuente primaria, características de la señal de ruido, etc.

### ***3.3.- Simulación de diferentes configuraciones CAR empleando WFS***

#### **3.3.1.- Array lineal**

Se considerará un array formado por n-elementos en línea, donde la fuente de ruido está a su izquierda, en cualquier posición en el plano del array, y el oyente se encuentra a la derecha.

Como primer caso, se considerará que la fuente estará localizada en el centro del array, a una distancia suficientemente grande del mismo, de la forma:

- posición fuente virtual (primaria):  $X=-300$ ,  $Y=0$  (en cm)
- distancia fuente primaria-array: 5 metros ( $X=200$ ,  $Y=-90$ )
- señal de ruido: tono puro a 100 Hz
- array de 10 altavoces, separados 20 centímetros entre sí

La señal de ruido, en un instante dado, sería:

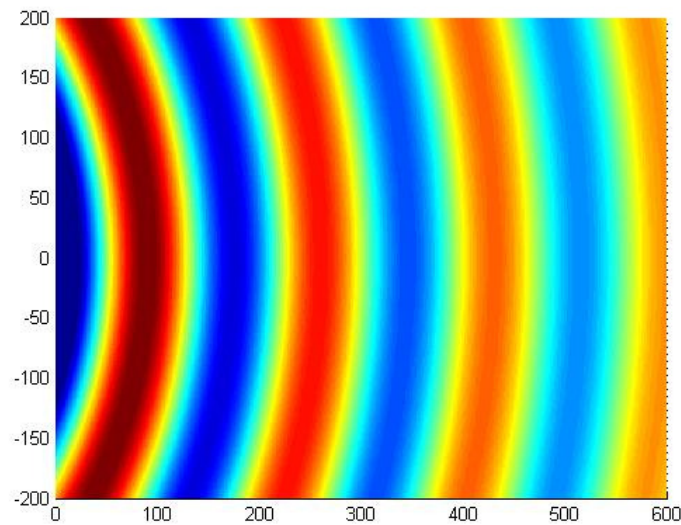


figura 13 - señal de ruido utilizada como base

Con el sistema WFS propuesto para la cancelación activa de ruido, observamos, en el mismo instante de tiempo, la señal reconstruida por el array:

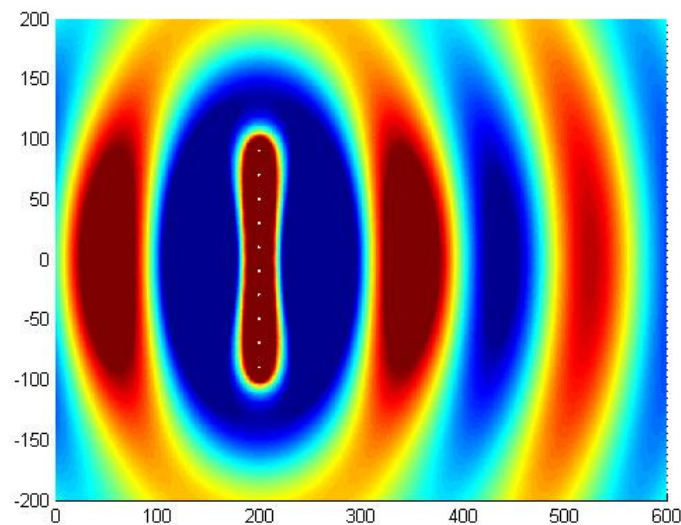


figura 14 - señal de ruido reconstruida

Puede apreciarse que solamente podemos considerar válida la señal reconstruida en la zona central de la simulación, pues en la superior e inferior se está fuera del alcance del array.

El campo total será la superposición de ambos, que según la simulación obtenida, visualmente resultará, en el mismo instante representado en los dos casos anteriores:

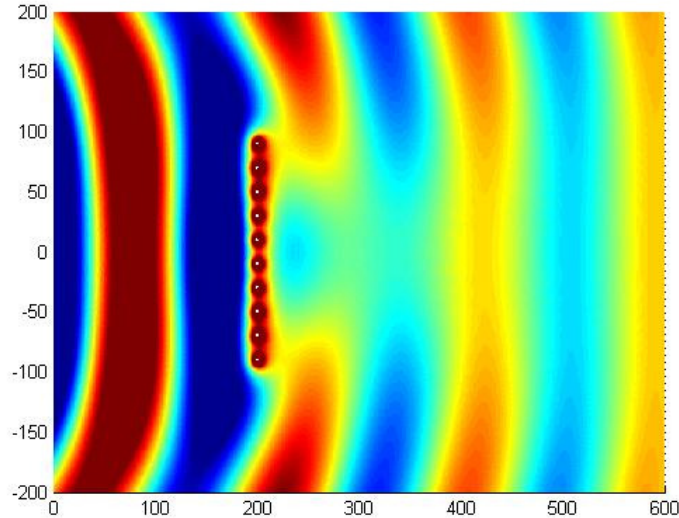


figura 15 - cancelación del ruido con array lineal,  $f=100$  Hz

Se aprecia una zona de silencio a la derecha del array. Se puede apreciar el fenómeno del aliasing espacial entre los altavoces que conforman el array, así como el efecto borde en el mismo. Con esta configuración, la longitud de onda es de  $\lambda=3,4$  metros, muy por encima de la separación entre centros del altavoz. Puede verse lo que ocurre al aumentar la frecuencia a 5 kHz:

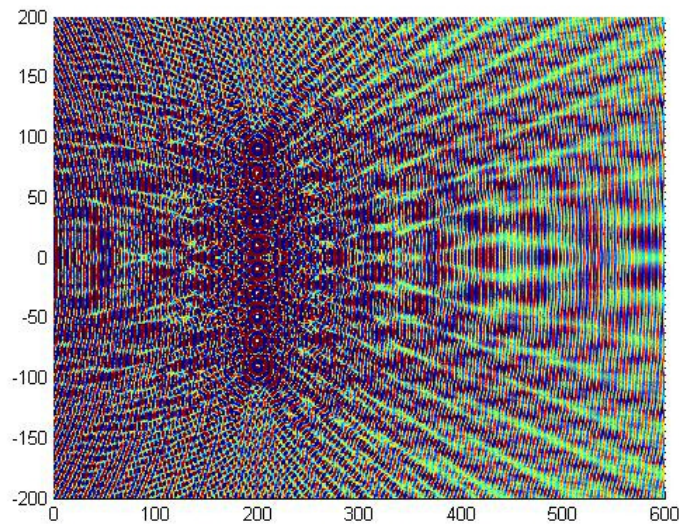


figura 16 - cancelación del ruido con array lineal,  $f=5$  kHz

Se aprecia que no es posible cancelar el ruido a altas frecuencias, tal y como se ha descrito en la introducción teórica a los sistemas WFS. Si en lugar de subir la frecuencia, aumentamos la distancia entre altavoces, ocurre algo parecido:

- $f=200$  Hz
- distancia entre altavoces: 1 metro (5 altavoces en la configuración anterior)

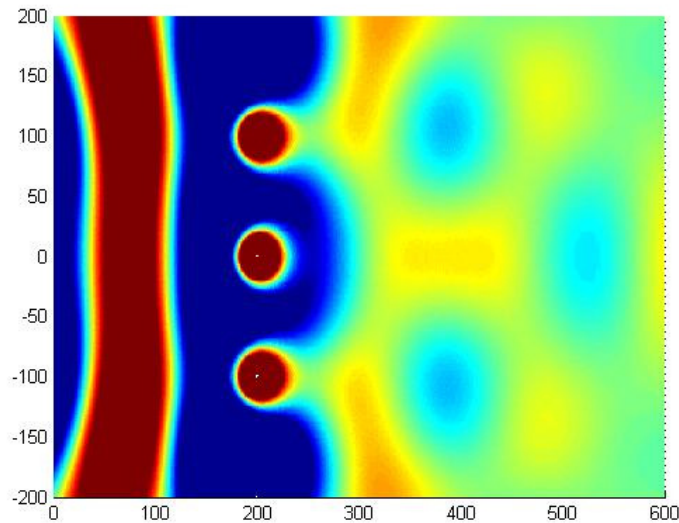


figura 17 - cancelación del ruido con array lineal,  $f=200$  Hz

Se observa que se produce aliasing espacial, debido a la separación entre altavoces. Aún así, en campo lejano puede apreciarse que se produce cancelación de una manera más o menos eficiente.

Si se mueve la fuente, manteniendo la distancia al array pero de manera que no quede perpendicular al mismo, en estas condiciones:

- fuente virtual en la posición  $X=-300$ ,  $Y=300$
- señal de ruido: tono puro a 100 Hz
- distancia fuente primaria-array: 5 metros
- array de 10 altavoces, separados 20 centímetros entre sí
- posición del array:  $(X=200, Y=-90)$

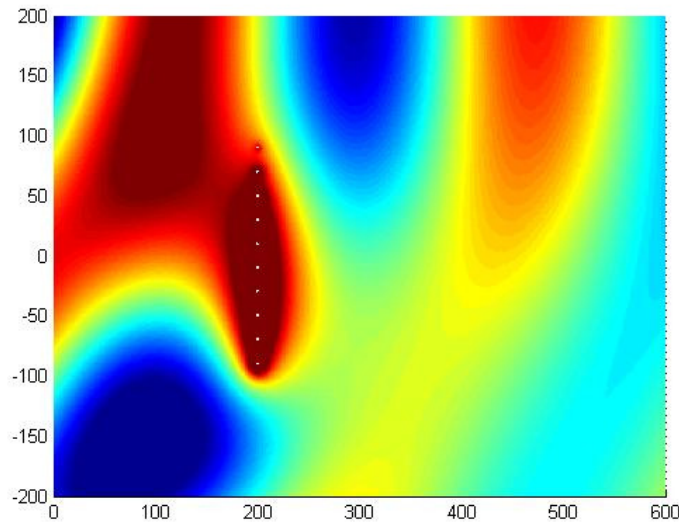


figura 18 - cancelación del ruido con array lineal,  $f=100$  Hz

Como puede apreciarse, el sistema responde razonablemente bien y consigue cancelarse gran parte del ruido a la derecha del array, creándose una zona de silencio similar al caso anterior, si bien esta zona está inclinada, en la dirección del frente de ondas. Esto puede corregirse con geometrías diferentes, por ejemplo con la geometría en 'L' propuesta en la figura 8 podría resolverse este problema.

Para casos más generales de ruido, que no son de banda ancha (ruido blanco) pero tampoco se limitan a tonos puros, es posible una reducción efectiva del ruido siempre que esté limitado en ancho de banda. Así, si al ruido blanco se le aplica un filtro paso bajo se obtiene, por ejemplo:



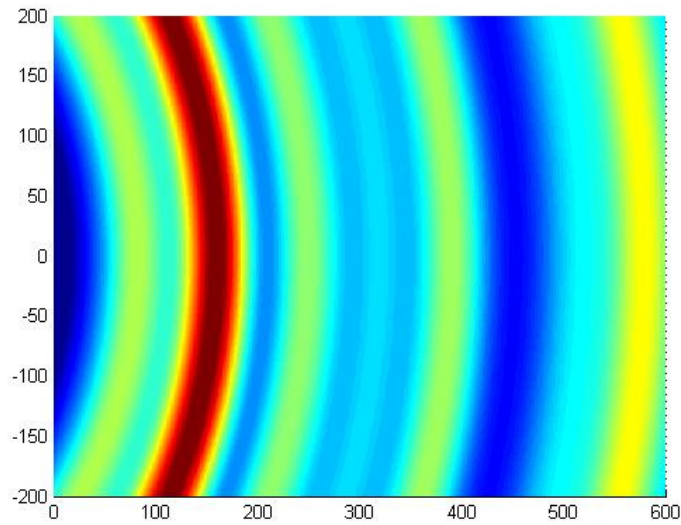


figura 19 - fuente de ruido blanco filtrada a 400 Hz

Si se usa esta señal en la fuente de ruido, el sistema responde de la siguiente manera:

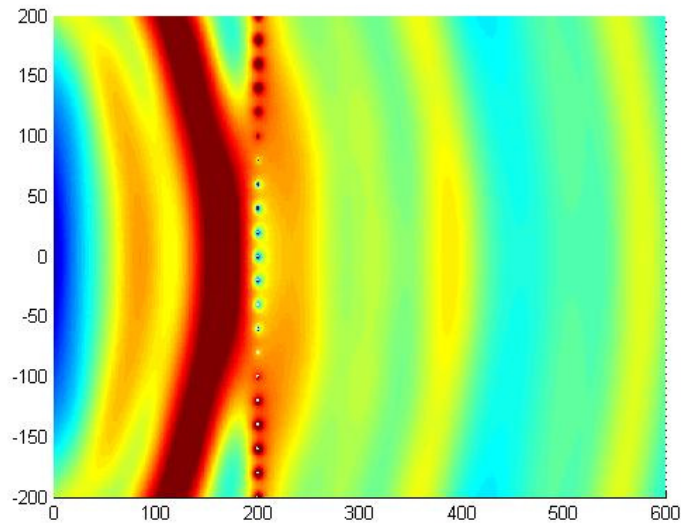


figura 20 - cancelación de ruido limitado a 400 Hz

Al aumentar la frecuencia se comprueba que, manteniendo la separación entre altavoces, aparecen errores debido al aliasing espacial. No ocurre lo mismo al limitar las bajas frecuencias. Por lo demás, de cara a extraer conclusiones sobre el funcionamiento de distintas geometrías, se observa que es indiferente tratar con ruido con un ancho de banda limitado o con tonos puros a la frecuencia de interés.

### 3.3.2.- Segmentos separados en un array lineal

En el caso particular de un array lineal, con huecos entre los mismos, por ejemplo en el caso de que uno o varios altavoces fallasen, se tendría la unión de varios segmentos en los que la separación entre ellos no coincide con la separación entre altavoz y altavoz.

La utilidad de esta distribución es la de simular casos de sistemas WFS en los que falla uno o varios altavoces. También es útil a la hora de simular sistemas formados por segmentos de array que cuentan con una separación entre altavoces menor a la que se puede considerar entre distintos segmentos, por ejemplo al considerar un sistema en el que en una sola caja se integran los altavoces de un segmento de array lineal, pero al unir varios de estos bloques no es posible mantener la distancia entre altavoces. Un caso particular sería:

- fuente virtual en la posición  $X=-300$ ,  $Y=0$
- señal de ruido: tono puro a 200 Hz
- distancia fuente primaria-array: 5 metros
- cada array tiene 9 altavoces, separados 10 centímetros entre sí
- 3 segmentos de array, separación de 40 centímetros entre segmentos

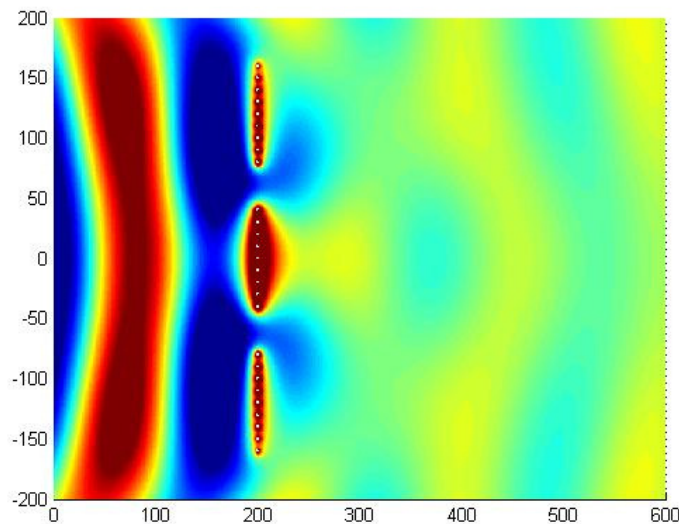


figura 21 - segmentos separados en array lineal,  $f=200$  Hz



Tal y como cabía esperar, el aliasing espacial va provocando errores hasta que se produce una difracción similar a la de los bordes de un solo array lineal, en el interior de la estructura. El funcionamiento del sistema empeora conforme se va subiendo la frecuencia.

Al desplazar la fuente, para observar el mismo problema con una incidencia del frente de ondas que no sea perpendicular al array, se obtiene:

- fuente virtual en la posición  $X=-300$ ,  $Y=200$
- señal de ruido: tono puro a 250 Hz
- misma configuración de array que en el caso anterior

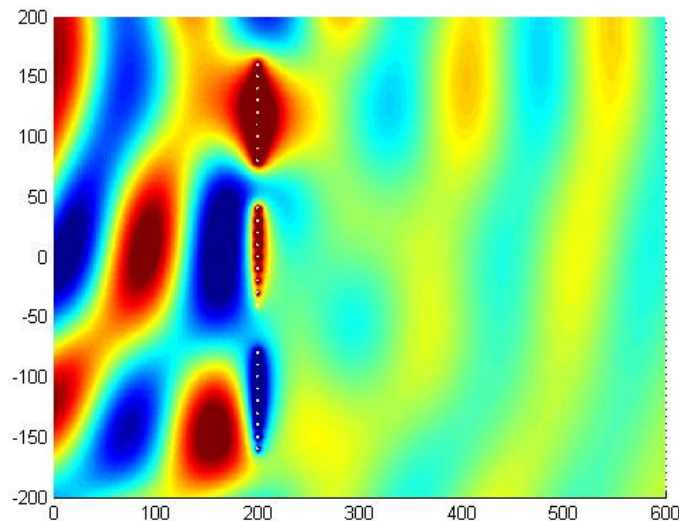


figura 22 - segmentos separados en array lineal,  $f=250$  Hz

Se observa que los errores de cancelación debidos a las separaciones entre segmentos no son tan acusados, pudiendo concluirse que el peor caso, con separación entre segmentos, se da cuando el frente de ondas es perpendicular al array.

### 3.3.3.- Fuente elevada sobre plano de array

Tal y como se ha descrito en la introducción teórica, la limitación a un plano obliga a situar tanto a la fuente virtual como al oyente en ese plano del array, sea cual sea la geometría adoptada. Una configuración 3D obligaría a un elevado número de altavoces y salidas independientes en la tarjeta de sonido o dispositivo que generase el canal correspondiente que alimenta a cada uno, lo que aumentaría el coste y complejidad del sistema enormemente. Puede, eso sí, simularse una fuente virtual fuera del plano, obteniéndola como una proyección sobre el plano del array, lo que provoca un error debido a la distancia real de la misma. Este hecho puede simularse, situando la fuente virtual a la distancia real pero sintetizando el campo sonoro mediante el sistema WFS empleando una proyección del mismo, con lo que visualmente se comprobará hasta qué punto afectan los errores debidos a la proyección sobre el plano del array. Como ejemplo se tiene:

- fuente virtual en la posición  $X=-300$ ,  $Y=0$
- señal de ruido: tono puro a 200 Hz
- distancia fuente primaria-array: 5 metros
- elevación: 1 metro

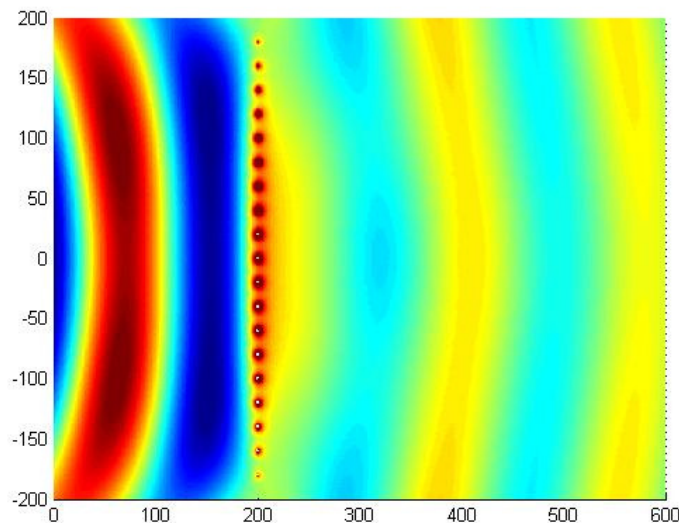


figura 23 - cancelación del ruido con array lineal, fuente elevada,  $f=200$  Hz

Al elevar la fuente sobre el plano y sintetizarse el campo a partir del plano, se produce un error tanto de amplitud como de fase, siendo este último crítico.

Si la fuente está situada lo suficientemente lejos del array, el error se minimizará considerablemente, pero en puntos relativamente cercanos a la fuente, se sintetizará un campo que no cancelará correctamente el ruido, apareciendo errores de fase que reducen la eficiencia del sistema.

### 3.3.4.- Array rectangular cerrado

Una configuración cerrada tiene la ventaja de que el frente de ondas puede llegar desde cualquier punto, no importa donde se sitúe la fuente virtual. El problema, como describen distintos autores, es que los altavoces que radian de cara al frente de ondas, en sentido contrario al mismo, provocarían una distorsión del campo en el interior del array. Es posible simular este caso para encontrar una alternativa. Manteniendo la configuración de la figura 12, pero cerrando el array mediante cuatro segmentos del mismo tamaño y desplazando el array a la posición (200,-100) (pueden variar para adaptarse a la sala o zona de silencio deseada):

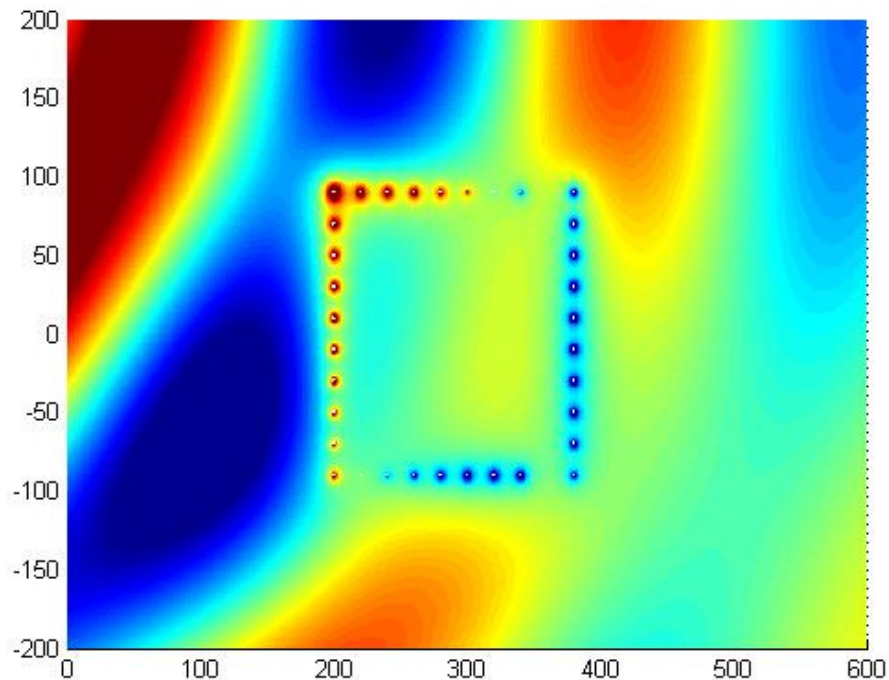


figura 24 - cancelación del ruido con array cerrado,  $f=100$  Hz

Como podía esperarse, el sistema trabaja mejor que con el array lineal, al no incidir la fuente de forma perpendicular al array lineal que servía como base en el ejemplo anterior.

En el interior del contorno se obtiene una cancelación efectiva, aunque hay ciertos efectos que se aprecian en la animación (aunque no en este fotograma en particular) que sugieren, como es sabido en distintos trabajos realizados con técnicas WFS, que los arrays de la zona derecha e inferior, en este caso, podrían desactivarse al radiar en sentido contrario al frente de ondas. De alguna manera, no aportan información, y sí provocan pequeños errores en la reconstrucción. Para ello, siempre que se cuente con una configuración cerrada, es posible usar técnicas como la de la visibilidad, la intensidad o la línea de referencia, vistas en la introducción teórica, para desconectar los segmentos que interesen.

Según esta conclusión, se podría limitar el campo a geometrías abiertas, y tratar los sistemas cerrados como la superposición de varias configuraciones abiertas. Esto nos permitirá comparar distintas configuraciones abiertas, cuyas conclusiones podrán extrapolarse a casos cerrados con geometrías rectangulares, circulares y otras que resulten de la unión de estas formas elementales.

### **3.3.5.- Geometría en 'U'**

Esta disposición cuenta con tres segmentos, de forma que sería una geometría rectangular a la que le falta uno de sus segmentos. Partiendo del ejemplo de geometría rectangular cerrada, y a raíz de las conclusiones extraídas, se considera que en este caso también habrá un segmento que podría desactivarse, sea cual sea el origen de la señal. Podría considerarse por tanto la geometría en 'U' como un caso de la superposición de dos geometrías en 'L', con un segmento común. La única aplicación de la geometría en 'U' es cuando se trata de ampliar una geometría lineal elemental, y el campo es perpendicular al array lineal original, con el fin de aislar de los efectos de borde, por ejemplo:

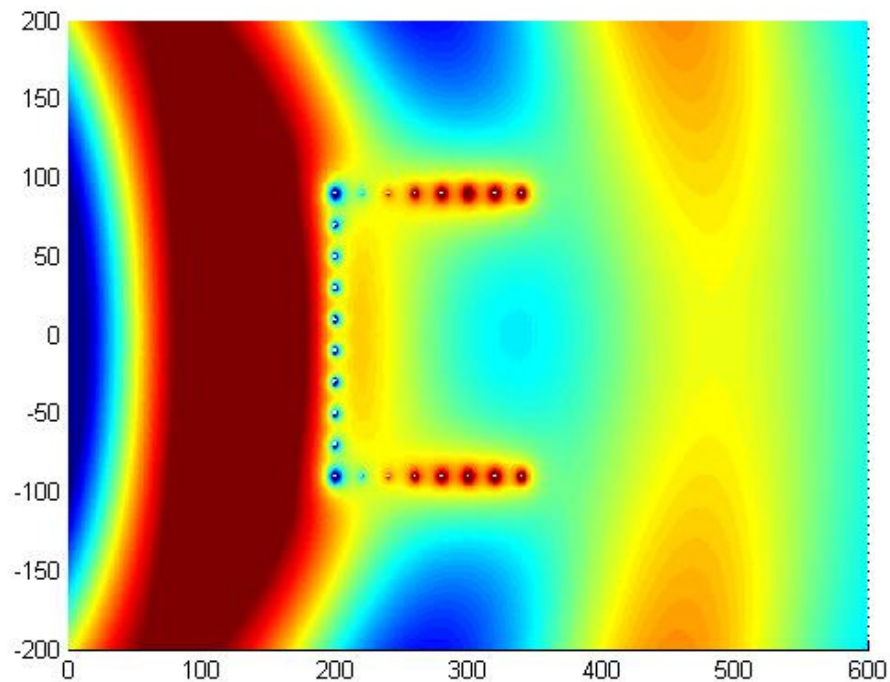


figura 25 - cancelación del ruido con array en 'U',  $f=100$  Hz

### 3.3.6.- Geometría en 'L'

Se puede considerar la unión de dos estructuras lineales, formando un ángulo de  $90^\circ$ , con la misma separación entre sus extremos que la que hay entre los altavoces de cada array. Como se ha comentado, es un caso válido para estudiar geometrías rectangulares en las que sólo se activan dos segmentos, al estar la fuente situada de forma que radie en el mismo sentido que radiarían estos dos segmentos.

Puede observarse que los resultados obtenidos, partiendo del mismo caso del array cerrado, son similares:

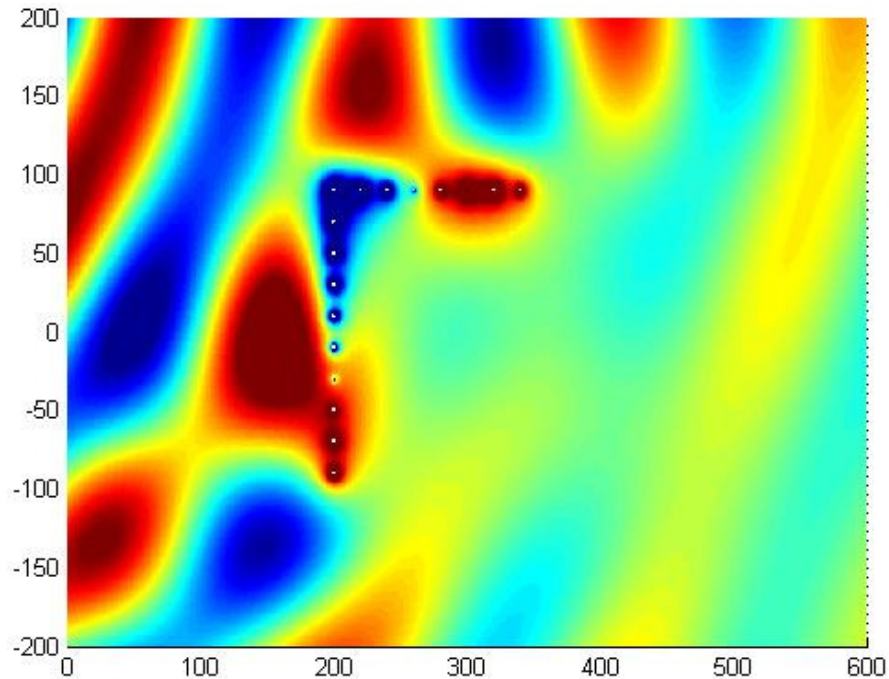


figura 26 - cancelación del ruido con array en 'L',  $f=200$  Hz

Como ya se ha podido observar en otros casos, se aprecia claramente que la síntesis WFS no trabaja correctamente en campo cercano, concretamente en el ángulo puede apreciarse este error.

### 3.3.7.- Geometría semicircular

En realidad no se recreará un semicírculo sino un fragmento de un polígono con cuantos lados se deseen, considerándose una buena aproximación. Si consideramos una forma octogonal, podría considerarse una forma de cinco lados. El caso a analizar es el siguiente:

- fuente virtual en la posición  $X=-300$ ,  $Y=0$
- señal de ruido: tono puro a 100 Hz
- distancia fuente primaria-array: 5 metros
- 5 segmentos de array de 5 altavoces, separados 20 centímetros entre sí

Se aprecia que los errores en campo cercano no son tan notables como en los ángulos rectos de las geometrías en 'U', 'L' o rectangulares:

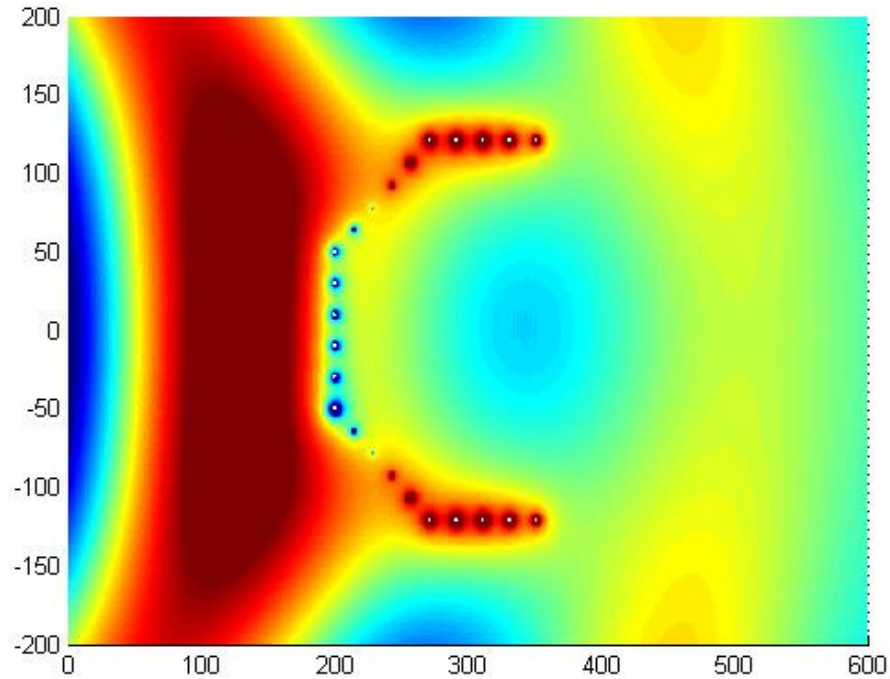


figura 27 - cancelación del ruido con array semiocotagonal,  $f=100$  Hz

### 3.3.8.- Geometría circular

Considerando el caso de manera análoga al anterior, se construirá una disposición octogonal, que se considerará aproximada a un círculo. Por tanto las consideraciones anteriores son las mismas aquí. Si se desea simular con más exactitud una geometría circular, por ejemplo por tratarse de una gran zona a tratar, se puede usar un polígono de más lados (decágono, dodecágono, etc.).

## 4.- Conclusiones

Los sistemas de Wave Field Synthesis, como técnica de recreación espacial de entornos acústicos, se ha mostrado efectiva para extender el control activo de ruido desde pequeños espacios (como ocurre con los sistemas CAR de control local) a zonas de silencio más amplias. Como cabía suponer, los sistemas WFS presentan algunos inconvenientes.

El primer problema es la complejidad y coste necesario para una implementación efectiva de las técnicas WFS, lo que limita su posible uso, especialmente pensando en aplicaciones móviles (vehículos) o en aplicaciones de bajo coste.

La precisión del sistema, como ya se adelantó en la introducción teórica, es clave para el buen funcionamiento del sistema. Así, pequeños errores en la amplitud o fase de la señal sintetizada mediante técnicas WFS conllevará inevitablemente errores, que se traducen en una reducción de ruido menos efectiva. Esto puede resolverse mejorando la resolución y frecuencia de muestreo del sistema, así como utilizando algoritmos adecuados para la reducción del error.

A pesar de los problemas planteados, se considera que los sistemas WFS son válidos para reducir el ruido en zonas más o menos amplias en determinadas situaciones, lo que supone una ventaja sobre los sistemas CAR tradicionales. Para ello, es conveniente tener caracterizada lo mejor posible la señal de ruido que radiará la fuente, así como conocer las geometrías y ajustes del sistema WFS.

### **4.1.- Fuentes y características de la señal**

La única limitación encontrada en la señal de ruido, aparte de la ubicación de la misma respecto al array, es la del ancho de banda, estando limitada a bajas frecuencias, tal y como se señaló en la introducción teórica. No hay limitaciones en cuanto a la ubicación de la fuente, siempre que se mantenga dentro del plano del array. Fuera del plano, si hay una elevación de la misma, es posible aún así cancelar el ruido, pero se limita la reducción a franjas en el espacio delimitado por el array. La fuente de ruido puede encontrarse en movimiento, si bien su caracterización y simulación debería ser motivo de estudio en posteriores trabajos, debido a cuestiones como el efecto Doppler y otros problemas debidos al movimiento.



## **4.2.- Geometrías del array**

La geometría empleada en el array del sistema WFS dependerá de la ubicación de la fuente de ruido. Si se conoce de antemano puede establecerse una forma abierta que cubra completamente la zona de silencio deseada, de forma que la radiación de los altavoces sea en el mismo sentido que la que sigue la fuente de ruido al dirigirse a la zona de trabajo. Esto permitirá una reducción del coste del sistema, al no ser necesario cerrar completamente el array.

En cuanto a la forma más adecuada, se encuentra que las formas lo más curvadas posibles son más eficientes al generar menos problemas en campo cercano (minimización del efecto de bordes). La separación entre los elementos del array es la considerada también en las teorías clásicas de WFS, señaladas en la introducción teórica. Sería deseable separaciones pequeñas entre altavoces, lo cual encarece y añade complejidad al sistema.

Ante esto, si se quiere subir la frecuencia de trabajo, se concluye que se puede optar por separaciones diferenciadas entre distintas vías de los altavoces, empleando separaciones en altavoces de agudos menores que en los altavoces de graves.

Como alternativas, es posible el empleo de altavoces DML o bien la utilización de técnicas mixtas WFS con otras más adecuadas para alta frecuencia. Esto limitaría la zona de silencio, pero sería la única manera de ampliar el ancho de banda empleado en la reducción de ruido.

## **4.3.- Otras consideraciones**

Se han tratado problemas relacionados con la síntesis WFS aplicada a los sistemas CAR, señalando como problema clave la necesidad de precisión en la amplitud y fase de la señal anti-ruido a generar. Esto obliga a una reflexión sobre la complejidad del sistema de procesamiento a emplear, requiriéndose grandes resoluciones y altas frecuencias de muestreo, siendo deseable pasar de los clásicos 16 bits y 44,1 kHz a otras más altas pero cada vez más viables, como 24 bits y 192 kHz. Para gestionar los distintos canales es necesario un estudio detallado del sistema de audio multicanal a emplear, pues son necesarias multitud de salidas (en sistemas WFS clásicos pueden ser de un mínimo de 100 altavoces).

#### **4.4.- Futuras líneas de investigación**

El sistema de simulación presentado aquí es un punto de partida ideal para distintas simulaciones con sistemas reales, tanto para aplicaciones CAR como para otras relacionadas con la síntesis sonora basada en técnicas WFS.

Se han estudiado casos en espacio libre, considerando las fuentes que forman el array como omnidireccionales. Se considera que la señal de ruido y ubicación de la fuente es conocida. Es conveniente extender el estudio a casos más realistas, caracterizando de forma adecuada las fuentes que forman el array y considerando recintos en lugar de espacio libre.

Sería conveniente ampliar el trabajo para tratar fuentes en movimiento, pues sería un caso de aplicación práctica en el mundo real, al tratar de reducir ruido que provenga de fuentes en movimiento, como vehículos. Ello llevaría a estudiar en profundidad los problemas relacionados con el efecto Doppler y su recreación mediante WFS, tal como modulaciones en frecuencia, así como otros problemas que pueden aparecer al calcular en cada instante la nueva posición de la fuente, y a modulaciones en amplitud derivadas de la variación de la ganancia recalculada en cada instante que aparecerían en la señal en movimiento.

Es interesante también ampliar los trabajos relacionados con el correcto filtrado aplicado en los retardos y cálculo de atenuaciones al recrear una fuente con un sistema WFS, pues se ha encontrado que no todos los errores aparecidos son debidos a la resolución y frecuencia de muestreo empleadas.

Una vez demostrado que estos sistemas pueden conseguir buenos resultados, sería conveniente estudiar y diseñar algoritmos que consigan emular la fuente de antiruido cuando no se conoce la ubicación de la misma y/o la evolución temporal de la señal de ruido.

Por último es conveniente la constatación de los resultados obtenidos con simulación, aplicándolos a implementaciones reales de sistemas WFS, caracterizando cada fuente real (altavoz del array) de la manera más fiel posible para simular correctamente un sistema real. Más allá de los resultados obtenidos, es interesante constatar que son realizables, realizando medidas reales y mejorando el entorno de simulación para que resulte lo más fiel posible a la realidad.

## 5.- Referencias bibliográficas

- [1] **Cobo, P.**, *Control Activo del Ruido: Principios y Aplicaciones*. Ed. CSIC , Colección Textos Universitarios, 27, 1997.
- [2] **S.M. Kuo, D.R. Morgan.** *Active Noise control: A Tutorial Review*. Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No 6, June 1999.
- [3] **H. F. Olson**, *Electronic Control of Noise, Vibration, and Reverberation*, J. Acoust. Soc. Am. 28, 966-972, 1956.
- [4] **S. J. Elliott and P. A. Nelson.** *Active Noise Control*, IEEE Signal Processing Magazine, October 1993.
- [5] **A. Oppenheim, R. W. Schaffer.** *Tratamiento de señales en tiempo discreto* (3ª ed.). Ed. Prentice-Hall, 2011
- [6] **Dieter Guicking**, *Active control of sound and vibration – History – Fundamentals – State of the art*. In: *Thomas Kurz, Ulrich Parlitz, and Udo Kaatze (Eds.): Oscillations, Waves, and Interactions – Sixty Years Drittes Physikalisches Institut – A Festschrift*. Universitätsverlag Göttingen, pp. 107-138, 2007.
- [7] **Ferrer, M.**, *Filtrado adaptativo multicanal para control local de campo sonoro basado en algoritmos de proyección afín*. Tesis doctoral. UPV. Valencia, 2008
- [8] **Lord Rayleigh**, *The Theory of Sound, Vol. II, Chapter XIV, § 282: ‘Two Sources of Like Pitch; Points of Silence; Experimental Methods’* (MacMillan & Co, London etc., 1st ed.: pp. 104–106; 2nd ed. (1894/96) and Reprints (Dover, New York): pp. 116–118), 1878
- [9] **A. J. Berkhout.** *Applied Seismic Wave Theory*. Elsevier Science, 1987.
- [10] **A. J. Berkhout, D. de Vries, y P. Vogel.** *Acoustic Control by Wave Field Synthesis*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 93, pp 2764-2778, 1993

- [11] **A. J. Berkhout.** *A holographic approach to acoustic control.* J. Audio Eng. Soc., 36(12):977-995, Dec. 1988.
- [12] **M.M. Boone and E.N.G. Verheijen,** *Multi-channel Sound Reproduction Based on Wave Field Synthesis*, prepr. 3719 95th AES Convention, New York, 1993.
- [13] **Bleda, S.,** *Contribuciones a la implementación de sistemas de Wavefield Synthesis.* Tesis doctoral. UPV. Valencia, 2009
- [14] **S. Spors, R Rabenstein, J. Ahrens.** *The Theory of Wave Field Synthesis Revisited*, 124th AES Convention, pp 7358, May 2008.
- [15] **G. Theile, Günther and H. Wittek.** *Wave Field Synthesis – a promising spatial audio rendering concept*, Acoustical Science and Technology, 25(6):393-399, 2004.
- [16] **D. de Vries and M. M. Boone,** *Wave field synthesis and analysis using array technology*, Proc. IEEE Workshop Applicat. Signal Process. Audio Acoust., 1999
- [17] **H. Wittek.** *Opsi: A hybrid WFS / phantom source solution to avoid spatial aliasing.* Technical report, IRT, 2002.

## Anexo I - Código MATLAB

### Función 'sim\_fuente'

```
function [ rpresion ] =
sim_fuente(sign_orig,fs,pos_x,pos_y,frames,lim_x,lim_y)

% función sim_fuente
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% simula campo generado por una fuente puntual
%
% sign_orig      : vector con muestras de señal original
% fs             : frec muestreo
% pos_x          : distancia origen X (cm) a la fuente (positivo:
izda)
% pos_y          : distancia del eje Y(cm) a la fuente (positivo:
abajo)
% frames         : número de frames a simular
% lim_x          : def espacio de trabajo (cm) a la derecha del
origen
% lim_y          : def +/- y sobre eje Y

% Parámetros de entrada auxiliares

vs=340;          % velocidad propagación en aire
tiempo=40;      % tiempo a representar en animación (ms)

% INI cálculos iniciales

inc_t=(tiempo/1000)/frames; % intervalo de tiempo (s) simulado en
cada frame
inc_sim=round(inc_t*fs);    % muestras que salta cada frame

long_sign=length(sign_orig);

% INI simulación

[x y]=meshgrid(0:1:lim_x,-lim_y:1:lim_y); % def. espacio de
trabajo

for cont=1:frames
    pres_parcial=zeros(size(x));

    r_parcial=sqrt((x+pos_x).^2+(y+pos_y).^2); % dist x,y a fuente
(cm)
    retardo_prop=round((r_parcial./(vs*100))*fs);
```

```
for cc1=1:lim_x+1
    for cc2=1:(lim_y*2)+1
        % ret=retardo_prop(cc2,cc1);
        ret=retardo_prop(cc2,cc1)+(inc_sim);
        if ((cont*inc_sim)>ret) & (cont*inc_sim)<=long_sign
            pres_parcial(cc2,cc1)=100*sign_orig((cont*inc_sim)-
ret)/r_parcial(cc2,cc1);
        end
    end

end

rpresion(cont, :, :)=pres_parcial;
end

end
```

**Función 'sim\_array\_gen'**

```

function [ rpresion ] =
sim_array_gen(sign_orig,fs,dist_fuente_x,dist_fuente_y,separacion,n_
array,orig_array,ang_array_deg,frames,lim_x,lim_y)

% función sim_array_gen
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% simula campo generado por una fuente puntual a través de un array
lineal
%
% sign_orig      : vector con muestras de señal original
% fs            : frec muestreo
% dist_fuente_x : distancia origen X (cm) a la fuente (positivo:
izda)
% dist_fuente_y : distancia del eje Y(cm) a la fuente (positivo:
abajo)
% separacion    : distancia (cm) de separación de cada elemento del
array
% n_array       : número elementos en array
% orig_array    : origen x,y del extremo izdo del array
% ang_array_deg : ángulo (grados) sobre la vertical
% frames        : número de frames a simular
% lim_x         : def espacio de trabajo (cm) a la derecha del
origen
% lim_y         : def +/- y sobre eje Y

if n_array==0 % retorna si no está definido
    rpresion=zeros(frames,lim_y*2+1,lim_x+1);
    return;
end

% Parámetros de entrada auxiliares

vs=340;          % velocidad propagación en aire

tiempo=40;      % tiempo a representar en animación (ms)

% cálculos iniciales

ang_array = pi*ang_array_deg/180 + pi/2; % convierte a radianes

inc_t=(tiempo/1000)/frames; % intervalo de tiempo (s) simulado en
cada frame
inc_sim=round(inc_t*fs);    % muestras que salta cada frame

long_array=(n_array-1)*separacion; % longitud array

dist_origen=sqrt(dist_fuente_x^2+dist_fuente_y^2); % distancia
fuente-origen

```

```

conta=1:1:n_array;

[ aux_x, aux_y ]=pol2cart(ang_array,(conta-1).*separacion);

pos_array(:,1)=aux_x+orig_array(1); % posición (en cartesianas) de
cada elto. array
pos_array(:,2)=aux_y+orig_array(2);

d=(sqrt(((dist_fuente_x+pos_array(:,1)).^2)+((dist_fuente_y+pos_arra
y(:,2)).^2))); % distancia (cm) de la fuente a cada
elemento del array

retardo=d./(vs*100); % retardo (en s.) entre fuente y cada
elemento del array

long_sign=length(sign_orig);

ini_array=(1./d)*100; % presión inicial desde cada elemento
del array

% ini simulación

[x y]=meshgrid(0:1:lim_x,-lim_y:1:lim_y); % def. espacio de
trabajo

for cont=1:frames
    presion=zeros(size(x));
    pres_parcial=zeros(size(x));

    for contador=1:n_array
        r_parcial=sqrt((x-pos_array(contador,1)).^2+(y-
pos_array(contador,2)).^2); % dist x,y a elto array
        retardo_prop=r_parcial./(vs*100); % retardo (s.) de
propagación a cada punto desde elto array

        for cc1=1:lim_x+1
            for cc2=1:(lim_y*2)+1

ret_total=round((retardo(contador)+retardo_prop(cc2,cc1))*fs);

                if (cont*inc_sim)>ret_total &
(cont*inc_sim)<=long_sign

pres_parcial(cc2,cc1)=100*ini_array(contador)*sign_orig((cont*inc_si
m)-ret_total)/r_parcial(cc2,cc1);
                    end
                end
            end

            presion=presion+pres_parcial; % cálculo presión array
        end

        rpresion(cont, :, :)=presion;
    end
end

```



## Función 'genera\_sign'

```
function [ sign_orig ] = genera_sign(frec,fs,long,tipo)

% función genera_sign
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% genera vector con muestras con la forma de onda deseada (entre -1
y 1)
%
% frec : frecuencia tono a generar
% fs   : frecuencia de muestreo
% long : número de muestras (longitud vector)
% tipo : sinusoidal (s), cuadrada (c), triangular (t), ruido blanco
(b)

inc_t=1/fs;      % intervalo de tiempo simulado en cada muestra
w=2*pi*frec;    % pulsación
conta=1:1:long;

if tipo=='s'
    sign_orig=sin(w*inc_t*conta);      % señal sinusoidal
elseif tipo=='c'
    sign_orig=square(w*inc_t*conta);   % cuadrada
elseif tipo=='t'
    sign_orig=sawtooth(w*inc_t*conta); % diente de sierra
elseif tipo=='b'
    sign_orig=wgn(long,1,1);          % ruido blanco

    error('tipo de señal no definido');
end

end
```

## Código principal 'car\_wfs'

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% CAR_WFS %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% A. Cano, septiembre de 2014

% Parámetros de entrada (distancias en centímetros)

dist_fuente_x=300; % distancia origen X (cm) a la fuente (positivo:
izda)
dist_fuente_y=-00; % distancia del eje Y(cm) a la fuente (positivo:
abajo)

num_arrays=3; % núm. segmentos de array lineales a simular

orig_array=[200 -100 ; 200 100 ; 200 -100]; % origen de cada
segmento de array lineal
ang_array_deg=[0 -45 -135]; % ángulo de cada
segmento sobre la vertical
separacion=[10 10 10]; % separación entre
altavoces
n_array=[21 21 21]; % num. altavoces por
segmento

x_silencio=250; % ptos para cálculo de ganancia en zona de
silencio
y_silencio=-0;

% Parámetros de entrada auxiliares

lim_x=600; % def espacio de trabajo (cm) a la derecha del
origen
lim_y=200; % def +/- y

frames=75; % n. de frames en animación

% generación de señal - se puede sustituir por carga de señal en
sign_orig

frec=200; % frec. a generar (tono puro)
fs=44100;
long=44100; % n. de muestras

sign_orig=4*genera_sign(frec,fs,long,'s'); % se genera una de las
señales tipo
%sign_orig=6*wavread('ruido400.wav'); % la señal de ruido se
carga desde un .wav
```

```

% ini FUENTE VIRTUAL - corregir origen si hay elevación sobre plano
array

rpresion0=sim_fuente(sign_orig,fs,dist_fuente_x,dist_fuente_y,frames
,lim_x,lim_y);

% ini ARRAYS

pres_array=zeros(size(rpresion0));

for contador=1:num_arrays

pres_array=pres_array+sim_array_gen(sign_orig,fs,dist_fuente_x,dist_
fuente_y,separacion(contador),n_array(contador),orig_array(contador,
:),ang_array_deg(contador),frames,lim_x,lim_y);
end

% ajuste ganancia global array

ganancia=zeros(frames,1);

ganancia=rpresion0(:,y_silencio+200,x_silencio)./pres_array(:,y_sile
ncio+200,x_silencio);
ganancia(find(isnan(ganancia)))=0;
g_prom=abs(median(ganancia(find(ganancia~=0))));

ganancia(find(abs(ganancia)>(g_prom*3)))=0;      % elimina picos
g_prom=abs(median(ganancia(find(ganancia~=0))));

if g_prom~=0
    pres_array=pres_array*g_prom;
end

% ini simulación

pres_aux=zeros(lim_y*2+1,lim_x+1);
pres_total=pres_array-rpresion0;      % cálculo presión total en cada
punto, por frame

close all;
figure

vidObj=VideoWriter('sim_CAR_WFS.avi');
vidObj.FrameRate = 25;
open(vidObj);

axis([0 lim_x -lim_y lim_y]);

set(gca,'NextPlot','replacechildren')
set(gcf,'Renderer','zbuffer');

```

```
[x y]=meshgrid(0:1:lim_x,-lim_y:1:lim_y); % def. espacio de
trabajo

for cont=1:frames
    pres_aux(:,:)=pres_total(cont, :, :);
    surf(x,y,pres_aux); % visualización suma
presiones

    axis([0 lim_x -lim_y lim_y])
    caxis([-1 1]);
    shading interp

    % colorbar;

    currFrame=getframe;
    writeVideo(vidObj,currFrame); % guarda fotograma en
'sim_CAR_WFS.avi'
end

close(vidObj);
```