

USANDO LABVIEW PARA SIMULAR LA DETECCIÓN DE SONIDOS SOBRE PLATAFORMAS MÓVILES

MSc. Seriosha Rodríguez Hernández

¹ Centro de Investigación y Desarrollo Técnico, CIDT, calle E, No. 20724, entre 2^{da} y carretera Varona, Rpto. El Trigal, Municipio Boyeros

¹e-mail: cidt@mn.mn.co.cu

RESUMEN

La detección acústica de los sonidos propios de vehículos terrestres, aéreos y navales desde ubicaciones fijas, al igual que la vigilancia acústica desde los propios vehículos, ha cobrado especial relevancia a nivel global en las últimas décadas, en particular, vinculada a problemas de defensa, mantenimiento del orden interior y seguridad nacional. La construcción de sistemas para tales aplicaciones demanda herramientas de simulación que permitan predecir su comportamiento tomando en cuenta aspectos como: la direccionalidad de la fuente sonora y los sensores, las pérdidas debidas a la propagación del sonido en la atmósfera y la función transferencial del canal de adquisición de datos. El presente artículo aborda el desarrollo de una herramienta software para simular la captura, en un vehículo en movimiento, de las huellas acústicas generadas desde una posición fija. En particular, es explicada la detección de disparos de armas de fuego sobre un vehículo terrestre en movimiento. Los resultados confirman que, en el diseño de un sistema de detección acústica de disparos de armas de fuego, para uso sobre un vehículo terrestre en movimiento, es posible aplicar los algoritmos de detección y estimación de la dirección de arribo empleados en sistemas análogos para ubicaciones fijas. El software propuesto fue desarrollado íntegramente usando el lenguaje de programación gráfica LabVIEW.

PALABRAS CLAVES: Vigilancia acústica, huellas acústicas, simulación, plataformas móviles, vehículos, LabVIEW.

USING LABVIEW FOR SIMULATE DETECTION ON MOVING PLATFORMS

ABSTRACT

Acoustic detection of land vehicles, aircrafts and vessels characteristic sounds, as well as acoustic surveillance on moving platforms, has become worldwide relevant in recent past decades, particularly those linked to defense, law enforcement, and national security issues. Construction of systems for such scenarios demands simulation tools for behavior prediction taking account aspects such as: sound sources and sensors directivity, sound waves atmospheric propagation losses, and acquisition channel transfer function. This paper is concerned with a software tool development to simulate the capture of acoustic signatures from fixed positions on a moving vehicle. The detection of gunshots from a fixed position using a vehicle-mounted gunshot detection system is specifically explained. Results confirm the usability of gunshot detection and direction of arrival estimation algorithms developed for ground gunshot detection systems. The proposed software was fully developed in LabVIEW graphic programming language.

KEY WORDS: Acoustic surveillance, acoustic signature, simulation, moving platforms, vehicles, LabVIEW

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha tenido lugar un incremento global sostenido del uso de sistemas de vigilancia acústica en aplicaciones de defensa, mantenimiento del orden interior y seguridad nacional. Se prevé que

este crecimiento mantenga su ritmo anual en los próximos cinco años. En particular, los pronósticos avizoran un mercado con ventas anuales superiores a los 1000 millones de dólares solo en sistemas de vigilancia acústica para la detección de disparos de armas de fuego [1].

La vigilancia acústica aporta valiosos datos para alertar y prevenir sobre la comisión de delitos y violaciones, así como enfrentar y esclarecer los hechos. De forma general, la vigilancia acústica consiste en monitorear el entorno acústico, en un espacio físico, durante cierto período de tiempo, con el propósito de detectar determinadas “huellas acústicas”. A su vez, una “huella acústica” es el conjunto de características de las señales de sonido, en los dominios del tiempo y la frecuencia, que, al tomar valores específicos, permiten aseverar la presencia del sonido emitido por determinada fuente sonora e inferir su presencia. Los modernos sistemas de vigilancia acústica detectan simultáneamente varios tipos de huellas acústicas y estiman la localización de las fuentes que las producen.

En determinadas situaciones las huellas acústicas son generadas desde plataformas en movimiento. Por ejemplo, los sonidos debidos al tráfico de vehículos terrestres, aéreos y navales constituyen una señal clara de alerta en caso de violación de perímetros de instalaciones sensibles, reservas naturales, áreas de acceso restringido y fronteras. Por otra parte, el desarrollo tecnológico ha propiciado la incorporación progresiva de sistemas de vigilancia acústica a diversas plataformas móviles tripuladas y no tripuladas. Como resultado, el diseño y construcción de sistemas de vigilancia acústica demanda disponer de herramientas que permitan predecir su comportamiento en tales escenarios. Comúnmente, la simulación de la generación y observación de huellas acústicas sobre plataformas móviles, se limita a demostrar el cambio en la frecuencia de la onda observada causado por la variación en el tiempo de la distancia entre la fuente sonora y el punto de observación o efecto “Doppler” [2].

El presente artículo comienza señalando aquellas situaciones en las cuales el monitoreo del entorno acústico y la generación de huellas acústicas ocurre desde plataformas en movimiento. A continuación, es propuesto un método para ejecutar la simulación asistida por computadora de la captura en plataformas móviles de señales emitidas por fuentes sonoras desde posiciones fijas. La propuesta incluye aspectos tales como: la directividad de la fuente de sonido y del sensor, la atenuación de las ondas sonoras debida a la absorción atmosférica y a la dispersión geométrica, la función transferencial del sensor, la función transferencial del canal de adquisición de datos del punto de observación, el ruido de fondo relacionado con el entorno acústico del sensor y la frecuencia de muestreo del conversor análogo/digital. Por último, el artículo muestra los resultados obtenidos en la aplicación del método propuesto al específico de la detección de los sonidos de disparos de armas fuego, empleando un sensor acústico sobre un vehículo terrestre en movimiento.

2. PLATAFORMAS MÓVILES, AMENAZAS Y OPORTUNIDADES

Con frecuencia, la comisión de hechos de carácter ilícito implica el uso vehículos terrestres, aéreos y navales. Los vehículos permiten a los transgresores incrementar su capacidad y velocidad de desplazamiento, capacidad de maniobra, capacidad de carga (volumen y peso) y posibilidades de escape.

La rápida diversificación y difusión de vehículos no tripulados fáciles de operar, en muchos casos exentos de licencias y permisos, no ha pasado inadvertida para aquellos que actúan al margen de la ley. Estos vehículos, genéricamente conocidos como vehículos operados de forma remota, (Remote Operated Vehicles, ROVs) incrementan las posibilidades de actuar impunemente, ya que permiten la ejecución de acciones a grandes distancias sin necesidad de participación directa.

En escenarios bélicos y civiles la presencia de vehículos puede estar asociada a:

- Tráfico ilegal (ej. armas, drogas y personas).
- Ataques terroristas sobre lugares de alta concentración de personas como: medios de transporte masivos, terminales aéreas, terminales de ferrocarril, terminales de ómnibus, puertos, estadios, teatros y plazas.
- Violación de fronteras y perímetros de áreas de acceso restringido.
- Ataques contra personas muy importantes (Very Important Persons, VIPs).
- Ataques contra instalaciones sensibles como: centrales de generación de energía eléctrica, puentes, estaciones de transmisión de señales radio y televisión, unidades militares, edificios gubernamentales, plantas químicas y de abastecimiento de agua potable.
- Explotación ilegal de recursos naturales (ej. caza, pesca, tala de árboles y minería).
- Acciones de guerra convencional, guerra química, guerra biológica, guerra psicológica y guerra radioelectrónica.

- Recopilación de información de inteligencia (espionaje).
- Invasión de la privacidad, vandalismo y robo.

El desarrollo de los medios de transporte no solo representa una amenaza de seguridad, también representa una oportunidad de expandir las posibilidades de los sistemas de vigilancia. Al igual que en el caso de los sistemas de exploración óptica y de radio, el uso de vehículos tripulados y no tripulados incrementa el alcance y movilidad de los sistemas de vigilancia acústica. Por ejemplo, la instalación de sistemas de vigilancia acústica a bordo de naves aéreas que vuelan a baja altura permite incrementar considerablemente el campo de visión y evitar los obstáculos propios de las zonas urbanas durante las misiones de vigilancia para detectar disparos ilegales de armas de fuego.

La firma holandesa Microflown AVISA ha reportado el desarrollo y empleo exitoso de dos sistemas para la exploración acústica aérea. Este es el caso del sensor del sistema “Acoustic Pointer” [3], soportado sobre un vehículo aéreo no tripulado de ala fija (mini-UAV, Unmanned Aerial Vehicle), el cual está concebido para la exploración omnidireccional. Este sistema suprime el ruido de fondo propio del UAV y detecta y estima la localización de: armas de fuego pequeñas usadas sobre el terreno; la posición de fuego sobre el terreno de cohetes, piezas de artillería y morteros; y naves aéreas cercanas. El sistema emplea sensores acústicos vectoriales tridimensionales. La Fig. 1 muestra la posición del sensor sobre el ala del dron que sirve de plataforma de transporte.



Figura: 1. Sensor acústico vectorial tridimensional del sistema “Acoustic Pointer” (círculo en rojo) colocado sobre el dron de ala fija que sirve de plataforma de transporte.

El sensor del sistema “SKYSENTRY” [4] consiste en un arreglo de sensores acústicos multipropósito (Acoustic Multi-Mission Sensors, AMMSs) para la detección y localización acústica de microdrones en ambientes urbanos. El arreglo está soportado sobre un pequeño dron de la firma Perch & Listen que permite su rápido despliegue hacia el punto de observación, ej. una azotea (ver Fig. 2). Al igual que en el caso anterior, emplea sensores acústicos vectoriales tridimensionales.

Los vehículos también son objeto de ataques contra sus ocupantes, por tanto, la incorporación de sistemas de vigilancia acústica a las plataformas móviles permite evadir peligros y emprender acciones de respuesta en caso de ataque. La necesidad de proteger los vehículos terrestres y aéreos contra la acción de francotiradores, en escenarios bélicos, ha propiciado el desarrollo de sistemas específicamente diseñados para detectar los sonidos asociados a disparos de armas de fuego, estimar la dirección del ataque e incluso estimar la localización del tirador (ver Fig. 3).



Figura: 2. Sensor de sistema “SKYSENTRY” (círculo en rojo) soportado sobre un dron y desplegado en una azotea.



Figura: 3. Sistema de detección de disparos FERRET [5], sobre un vehículo blindado. El círculo rojo indica el arreglo de sensores acústicos en forma de tetraedro regular.

3. SIMULACIÓN

Como paso previo a la simulación de la captura de los sonidos en situaciones donde la distancia entre la fuente y el punto de observación varía en el tiempo, son expuestos aquellos aspectos a tomar en cuenta en la modelación:

- Directividad. El nivel de presión sonora radiada por una fuente y la sensibilidad del sensor dependen de la posición de observación relativa a una dirección principal, en la cual, es posible observar el máximo nivel de presión sonora radiado o la mayor sensibilidad. A medida que el punto de observación se aleja de la dirección principal, definida por los ángulos de acimut (θ_s), y elevación (φ_s), el nivel de presión sonora (o la sensibilidad) decrece. En el caso de las armas de fuego pequeñas y ligeras en el sentido de la boca del cañón tiene lugar el nivel máximo de presión sonora emitido. En muchos casos la directividad es también una función de la frecuencia (ω).
- Distancia fuente – punto de observación. La posición relativa de la fuente con respecto al punto de observación y viceversa ($r(t)$), varía en el tiempo produciendo cambios apreciables en la frecuencia de las principales componentes de la señal observada. Este fenómeno, conocido como efecto “Doppler”, es referido por varios autores [6,7] y permite establecer características de las fuentes sonoras en movimiento a partir del análisis de las muestras grabadas en puntos fijos de observación [8-11].
- Pérdidas por propagación del sonido en la atmósfera. La atenuación de las ondas sonoras debida a la propagación en la capa superficial de la atmósfera A , puede ser estimada, en decibeles, mediante la ecuación general de propagación establecida en las normas ISO 9613-1, ISO 9613-2 y Nord2000 [12-14].

$$A = A_{div} + D_c - A_{abs} - A_E \quad (1)$$

Donde: A_{div} es la atenuación debida a la divergencia geométrica, D_c es la corrección de directividad, A_{abs} es la atenuación debida a la absorción atmosférica, y A_E es la atenuación extra que puede ser desglosada de la siguiente forma:

$$A_E = A_{clima} + A_{suelo} + A_{turbulencia} + A_{barreras} + A_{vegetación} + A_{misc} \quad (2)$$

donde: A_{clima} es la atenuación debida a condiciones climatológicas, A_{suelo} es la atenuación debida a los efectos del suelo, $A_{turbulencia}$ es la atenuación debida a los efectos de la turbulencia atmosférica, $A_{barreras}$ es la atenuación debida a barreras naturales o artificiales, $A_{vegetación}$ es la atenuación debida a la vegetación, y A_{misc} es la atenuación debida a otros efectos entre los que se encuentran: propagación a través de zonas industriales, y a través de zonas urbanas residenciales.

Las ecuaciones anteriores son válidas para la capa superficial de la atmósfera que, regularmente, tiene un espesor entre 50 y 100 metros de altura en horario diurno y tiende a disminuir en horario nocturno [15]. Por tanto, para simular la propagación de ondas sonoras producidas o capturadas por naves aéreas que vuelan a alturas mayores, deben ser empleadas expresiones matemáticas que modelen el efecto de estratificación de la atmósfera. Las expresiones matemáticas anteriores son aplicables a fuentes sonoras y vehículos terrestres, navales de superficie y aéreas que vuelen a baja altura.

Entorno acústico. El ruido acústico de fondo, en el punto de observación es el resultado de la superposición de todas las fuentes de ruido distintas a la fuente sonora de interés e influye en la relación señal/ruido de la señal observada. Si el punto de observación se encuentra sobre una plataforma móvil resultan predominantes los ruidos del motor del vehículo y del flujo de aire inducido que incide sobre el sensor debido al desplazamiento del vehículo.

Canal de adquisición de datos. Este canal está formado por el sensor acústico, los circuitos de acondicionamiento de señal y el conversor análogo/digital. El ruido propio de estos elementos se añade al ruido acústico de fondo capturado por el sensor y completa el nivel de ruido total que define la relación señal/ruido de la señal observada.

La Fig. 4 muestra un diagrama en bloques donde aparecen relacionados los elementos mencionados. En la figura, el estímulo p_s , generado por el modelo de fuente sonora (1), desde una ubicación fija o en movimiento, es aplicado a la entrada del modelo de variación de la distancia fuente-sensor en el tiempo (2) y la salida de este es aplicada a la entrada del modelo de atenuación total debida a la propagación en la capa superficial de la atmósfera (3), que entrega una versión de la señal de estímulo atenuada y demorada p_{s_1} .

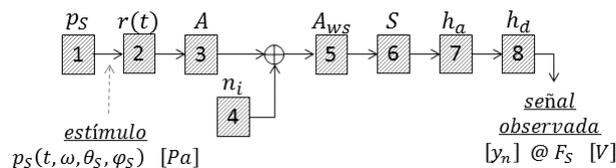


Figura: 4. Diagrama en bloques del modelo matemático para la simulación de la observación de las ondas sonoras.

En la posición que ocupa el sensor tiene lugar la superposición de la señal de estímulo p_{s_1} y los ruidos propios del entorno acústico n_i . Cada señal de ruido es generada por un modelo matemático (4), que expresa el comportamiento del nivel de presión sonora en los dominios del tiempo y la frecuencia. Las señales de ruido son consideradas estadísticamente independientes, no correlacionadas entre sí y con respecto a la señal de estímulo. La combinación lineal de la versión de la señal de estímulo atenuada y demorada p_{s_1} y el ruido produce la señal de entrada al sensor p_R .

Los modelos de los elementos de hardware son considerados como sistemas lineales e invariantes en el tiempo. La pantalla anti-viento (5), introduce una atenuación extra A_{ws} , a las ondas sonoras que depende fundamentalmente de sus dimensiones, forma, tipo de material y frecuencia de las ondas incidentes [16,17]. A continuación, el micrófono (6), es modelado a partir de su sensibilidad S , que depende de la frecuencia y dirección de arribo de las ondas incidentes. Los circuitos de acondicionamiento de señales (7) y el conversor análogo/digital (8) son modelados empleando sus funciones transferenciales h_a y h_d , que dependen de la frecuencia e incluyen el ruido propio equivalente de entrada. Los datos de las señales digitalizadas constituyen la señal observada con determinada frecuencia de muestreo F_s . Comúnmente, el

ruido propio de los elementos del canal de adquisición es representado como una fuente de ruido equivalente independiente añadida a la entrada del canal junto a las fuentes de ruido que conforman el entorno acústico.

Como información inicial, para ejecutar la simulación de la captura en una plataforma móvil de las ondas sonoras generadas desde un punto fijo, además es necesario conocer: el período de simulación (T); la posición fuente sonora $s[x_s, y_s, z_s]$; la ecuación de la trayectoria de la plataforma de observación $p(t, x, y, z)$, su velocidad (v) y aceleración (a); el punto inicial de la trayectoria a considerar $p_0[x_{p0}, y_{p0}, z_{p0}]$; la expresión que describe el comportamiento de la presión sonora generada en los dominios del tiempo y la frecuencia $p_s(t, \omega)$ y la velocidad de propagación del sonido en el aire (c).

La simulación de la captura sobre una plataforma móvil de las muestras generadas en un punto fijo (ver Fig. 5) es relativamente simple, ya que, la plataforma demora un tiempo constante ($dt = 1/F_s$) en desplazarse entre dos puntos de observación contiguos. Las coordenadas de estos puntos son calculadas empleando la ecuación de la trayectoria, por ejemplo, la ecuación 3 corresponde a una trayectoria en línea recta.

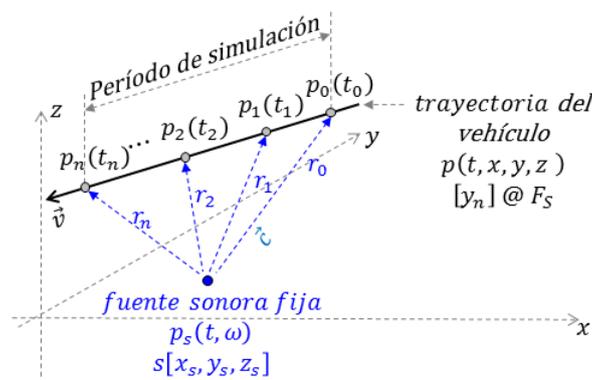


Figura 5: Representación espacial de la propagación de las ondas sonoras desde una posición fija hasta los puntos de observación en la trayectoria de una plataforma móvil.

$$\begin{cases} x_{pn} = x_{p0} + v_x ndt \\ y_{pn} = y_{p0} + v_y ndt \\ z_{pn} = z_{p0} + v_z ndt \end{cases} \quad (3)$$

Una vez conocidas las coordenadas de los puntos de observación en la trayectoria de la plataforma móvil, es calculada la distancia (r_n) entre cada uno y la fuente sonora (ver ecuación 4). El tiempo de propagación de cada muestra observada es calculado dividiendo las distancias recorridas entre la velocidad de propagación del sonido en el aire ($t_{pn} = r_n/c$). De esta forma, el instante de generación de cada muestra observada (t_{gn}) puede ser calculado restando el tiempo de propagación del tiempo de observación ($t_{gn} = ndt - r_n/c$). A su vez, el instante de generación de cada muestra observada permite calcular la presión sonora correspondiente empleando la expresión conocida de $p_s(t, \omega)$ evaluada para $t = t_{gn}$, o sea, $p_{Sn} = p_s(t_{gn}, \omega)$.

$$r_n = \sqrt{(x_{pn} - x_s)^2 + (y_{pn} - y_s)^2 + (z_{pn} - z_s)^2} \quad (4)$$

Como resultado es obtenido un arreglo de parejas de valores $[p_{Sn}, r_n]_{N \times 2}$, donde N es la cantidad de muestras observadas durante el período de simulación T .

Los valores de r_n permiten aplicar a cada valor de p_{Sn} la correspondiente atenuación por dispersión geométrica. Además, tomando en cuenta la posición relativa entre los ejes principales de la fuente y el sensor en cada punto de observación, es calculada y aplicada la atenuación por directividad. El resto de las atenuaciones, introducidas por la propagación atmosférica de las ondas sonoras y los elementos del canal de adquisición de datos, son introducidas en el dominio de la frecuencia, aplicando la transformada de Fourier sobre paquetes de muestras de la señal observada considerando la distancia de propagación promedio por paquete. El ruido de fondo, correspondiente al punto de observación, es ponderado de acuerdo a la función transferencial de los elementos del canal de adquisición y añadido a las muestras observadas.

La Fig. 6 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de simulación.

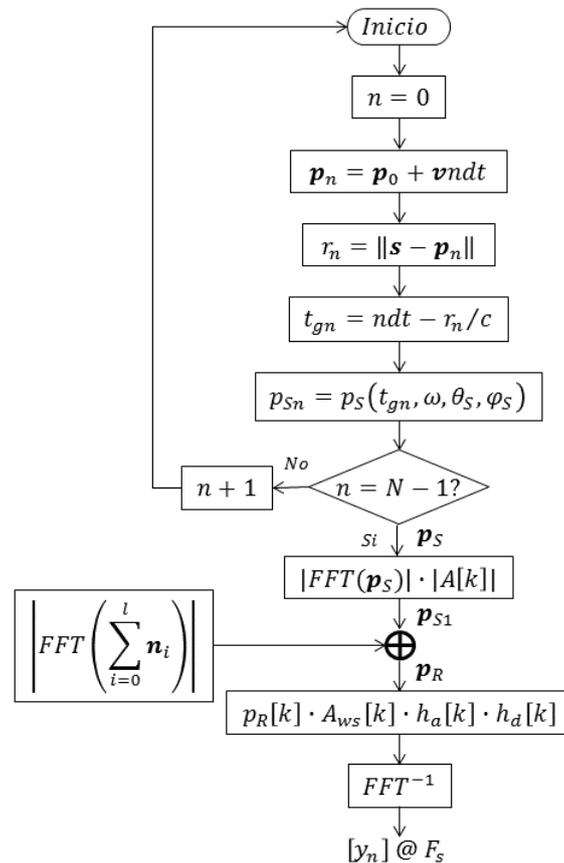


Figura 6: Diagrama de flujo del algoritmo de simulación. N : cantidad de muestras observadas en T .

4. RESULTADOS

Como primer caso es abordada la simulación de la captura sobre un vehículo de las muestras generadas en un punto fijo. Las condiciones de simulación son:

- Trayectoria del vehículo: línea recta paralela al terreno, a una altura de 100 metros y una velocidad constante de 180 km/h (50 m/s).
- Directividad: la fuente y el sensor son omnidireccionales.
- Forma de onda de la presión sonora generada: $sen(2\pi 2000t)$.
- Posición inicial del vehículo: $\mathbf{p}_0[750,0,100]$
- Rumbo del vehículo: acimut 270° , elevación 0° .
- Velocidad de propagación del sonido en el aire: 346.5 m/s.
- Posición de la fuente sonora: $\mathbf{s}[0,0,0]$.
- Período de simulación: 30 segundos.
- Frecuencia de muestreo: 22050 S/s.

De acuerdo a los datos anteriores, al transcurrir 15 segundos el vehículo se encontrará directamente sobre la fuente sonora, la distancia entre ambos será mínima (ver Fig. 7) y la amplitud de la señal observada máxima (ver Fig. 8). En ese instante la frecuencia observada coincide con la frecuencia de la fuente sonora (ver Fig. 9).

USANDO LABVIEW PARA SIMULAR LA DETECCIÓN DE SONIDOS SOBRE PLATAFORMAS MÓVILES

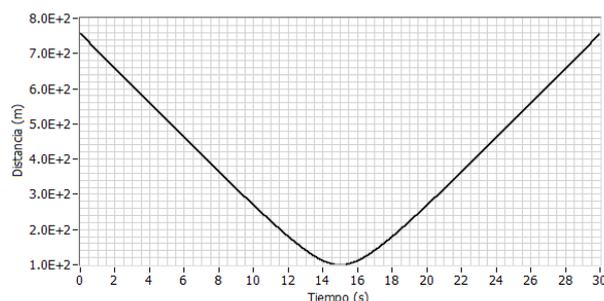


Figura 7: Gráfica de distancia entre la fuente sonora y la plataforma de observación móvil vs. tiempo.

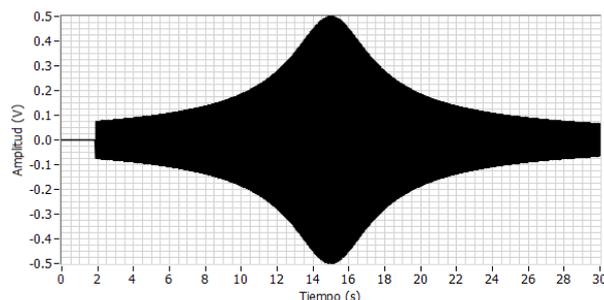


Figura 8: Gráfica de amplitud vs. tiempo de la forma de onda observada en el tiempo.

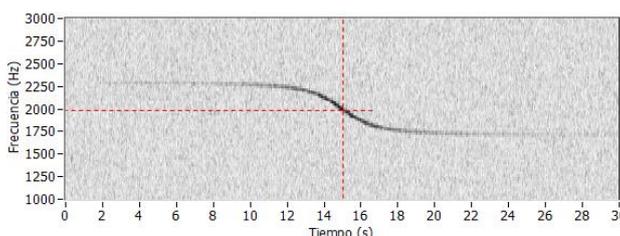


Figura 9: Espectrograma de la secuencia de muestras observadas.

A continuación, es abordada la simulación de la captura en un vehículo del sonido propio de la explosión en la boca de cañón de un disparo de arma de fuego realizado desde una posición fija. Debido a la corta duración de la onda impulsiva propia de los disparos de armas de fuego, no es posible percibir el efecto “Doppler” en la muestra capturada. La variación de la frecuencia percibida se manifiesta como una ligera deformación de la forma de onda, la cual, tiene su máxima expresión si el vehículo transita en la misma dirección de propagación del sonido. Si transita en el mismo sentido (ver Fig. 10), tendrá lugar un ensanchamiento. En cambio, en sentido inverso (ver Fig. 11), tendrá lugar un estrechamiento. A medida que la velocidad del vehículo aumenta, la deformación se incrementa. Las condiciones de simulación, son:

- Trayectoria del vehículo: línea recta paralela al terreno a una altura de 2 metros y una velocidad constante entre 10 km/h y 240 km/h.
- Directividad: la fuente y el sensor son omnidireccionales.
- Forma de onda de la presión sonora generada: Modelo de la explosión al aire libre de Friedlander [18,19].

$$p_s(t) = p_{pk}(1 - t/c)e^{-t/c}; \quad T = 6 \quad (5)$$

donde: p_{pk} es el valor pico de presión sonora, c es la duración de la fase positiva de la onda y T su duración total.

- Posición de la fuente sonora: $\mathbf{s}[0,0,1.5]$
- Rumbo del vehículo: acimut 90° , elevación 0° alejándose de la fuente (ver Fig. 15) y acimut 270° , elevación 0° acercándose a la fuente (ver Fig. 16).
- Velocidad de propagación del sonido en el aire: 346.5 m/s.
- Posición inicial del vehículo: $\mathbf{p}_0[300,0,2]$.

- Período de simulación: 2 segundos.
- Frecuencia de muestreo: 22050 S/s.

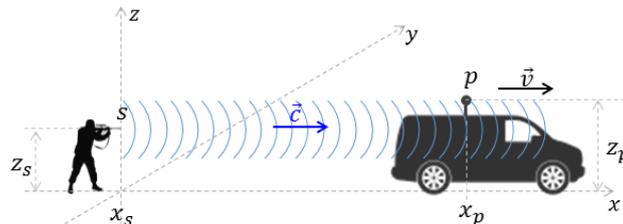


Figura 10: Vehículo alejándose de la fuente sonora en la misma dirección y sentido de la propagación del sonido generado. Sobre el vehículo está colocado el punto de observación p .

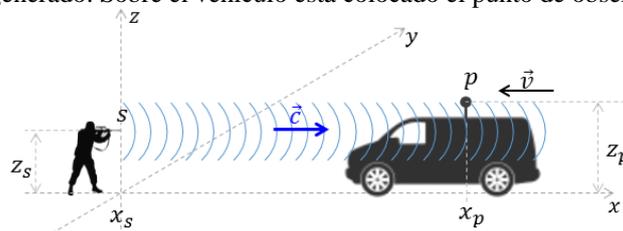


Figura 11: Vehículo acercándose a la fuente sonora en la misma dirección y sentido de la propagación del sonido generado. Sobre el vehículo está colocado el punto de observación p .

Los resultados obtenidos coinciden con el comportamiento esperado. La Fig. 12 muestra el ensanchamiento de la forma de onda al alejarse el vehículo a una velocidad de 240 km/h. Mientras que la Fig. 13 muestra el efecto de estrechamiento debido a la aproximación del vehículo a igual velocidad.

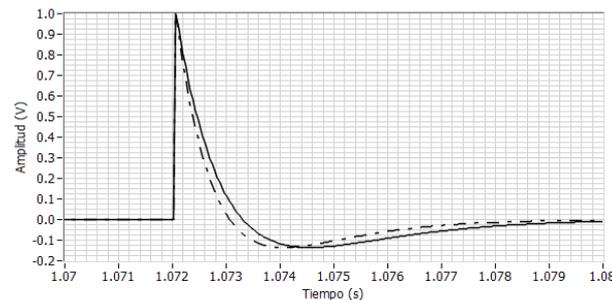


Figura 12: Resultado de la simulación (vehículo alejándose a 240 km/h). Forma de onda observada (trazo continuo), forma de onda generada (trazo discontinuo).

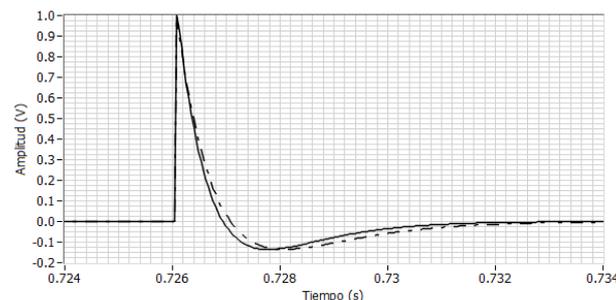


Figura 13: Resultado de la simulación (vehículo acercándose a 240 km/h). Forma de onda observada (trazo continuo), forma de onda generada (trazo discontinuo).

USANDO LABVIEW PARA SIMULAR LA DETECCIÓN DE SONIDOS SOBRE PLATAFORMAS MÓVILES

En ambos casos, no fueron añadidos los efectos de atenuación a la simulación para poder apreciar solo el efecto de la variación de la posición entre la fuente y el sensor en el tiempo. Como resultado de las simulaciones realizadas es posible predecir que las formas de onda de los disparos de armas de fuego no sufrirán distorsiones de consideración debidas al efecto “Doppler”. Por ello, en el rango de velocidades establecidas para el tráfico de vehículos en ambientes urbanos, rurales y autopistas de alta velocidad, serán considerados como aplicables los algoritmos de detección de disparos desarrollados y reportados en la literatura técnica para uso en puntos de observación fijos.

La Fig. 14 muestra los resultados superpuestos de varias simulaciones ejecutadas a diferentes velocidades, en todos los casos el vehículo se acerca a la fuente y solo fue añadida la atenuación por dispersión geométrica de las ondas sonoras. Es posible apreciar cómo, a medida que la velocidad aumenta, el tiempo de arribo disminuye y el valor pico aumenta.

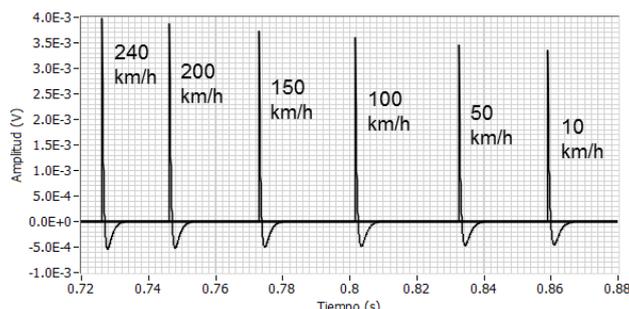


Figura 14: Resultado de la simulación (vehículo acercándose a varias velocidades).

El algoritmo de simulación fue implementado sobre el lenguaje de programación gráfica LabVIEW™, el cual brinda excelentes posibilidades para la representación gráfica de los resultados. Pero no posee funciones específicas para simular la propagación del sonido en la capa superficial de la atmósfera. Por ello, fue necesario desarrollar los VIs (funciones) que ejecutasen tales cálculos. Entre los VIs desarrollados se encuentran:

- Atenuación debida al efecto del suelo (reflexión simple, Nord2000).
- Atenuación debida a la absorción atmosférica (ISO 9613-1, 1993).
- Atenuación debida a condiciones climáticas no estándar (ISO 9613-2, 1996).
- Atenuación por dispersión geométrica.
- Velocidad de propagación del sonido en el aire en función de la temperatura ambiente.

La Fig. 15 muestra las gráficas de atenuación por absorción atmosférica vs. frecuencia obtenidas para las distancias entre la fuente y el sensor de: 100 m, 250 m, 500 m, 750m, 1000 m y 1250 m; presión atmosférica Pa: 101.325kPa; temperatura ambiente, T: 25°C; y humedad relativa, hr: 85%.

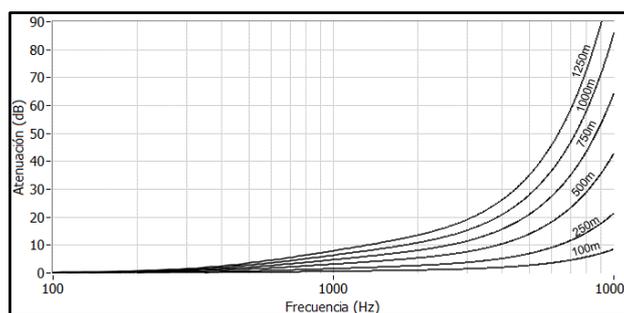


Figura 15: Gráficas de atenuación por absorción atmosférica (dB) vs. frecuencia (Hz) obtenidas con el VI desarrollado para el lenguaje de programación gráfica LabVIEW™.

La Fig. 16 muestra la gráfica de atenuación debida al efecto del suelo vs. frecuencia obtenida para las siguientes condiciones: Terreno: plano, superficie homogénea, rugosidad: Nil (nula), Clase de impedancia: F, resistividad de flujo representativa (σ): 20000 kNs/m⁴, altura de la fuente: 1m, altura del receptor: 6.5 m, distancia: 75 m, c: 345 m/s.

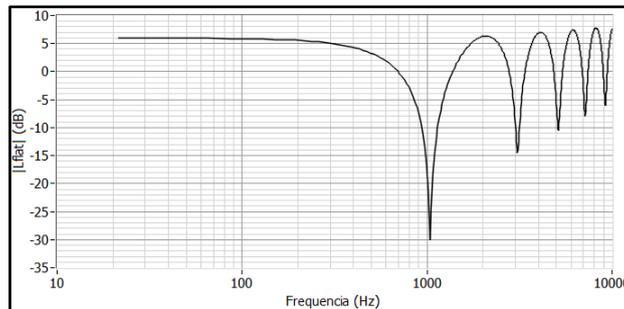


Figura 16: Gráficas de atenuación por efecto del suelo (dB) vs. frecuencia (Hz) obtenidas con el VI desarrollado para el lenguaje de programación gráfica LabVIEW™.

5. CONCLUSIONES

- En las últimas décadas se ha producido un incremento a nivel global en el uso de vehículos terrestres, aéreos y navales para la comisión de hechos delictivos y contra la seguridad del estado. Como consecuencia ha tenido lugar un incremento sostenido del desarrollo, producción y empleo de sistemas de vigilancia acústica para la detección de vehículos. Varios estudios indican que este crecimiento continuará invariable en los próximos 5 años.
- Los vehículos aéreos pequeños y que vuelan a baja altura, en particular aquellos no tripulados, constituyen una seria amenaza para la seguridad del estado y el orden interior. Estos se han convertido en una herramienta preferida de organizaciones criminales y terroristas.
- Los LFAs (Low Flying Aircrafts) y UASs (Unmanned Aerial Systems) también permiten incrementar las posibilidades de los sistemas de vigilancia acústica en el cumplimiento de misiones de vigilancia para preservar el orden interior y la seguridad del estado, tanto en entornos rurales como urbanos.
- En el estudio y caracterización de los sonidos producidos por los UASs convergen especialidades de la acústica como: el estudio de ruidos de máquinas rotatorias (motores), la aeroacústica y el estudio de la propagación del sonido en la atmósfera.
- El método de simulación propuesto permite evaluar y predecir el desempeño de los sistemas de vigilancia acústica en misiones de vigilancia acústica sobre plataformas móviles.
- Los resultados permiten asegurar que, en el diseño de un sistema de detección de disparos de armas de fuego para uso sobre un vehículo terrestre en movimiento, en el rango de velocidades desde 10 km/h hasta 240 km/h, será posible aplicar los algoritmos de detección y estimación de la dirección de arribo empleados en sistemas de detección de disparos de armas de fuego para ubicaciones fijas.
- Las funciones desarrolladas para realizar los cálculos de atenuación debida a la propagación del sonido en la capa superficial de la atmósfera, amplían las posibilidades del lenguaje de programación gráfica LabVIEW™.

REFERENCIAS

- [1] MarketsandMarkets™. Ed., «GUNSHOT DETECTION SYSTEM MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2024». <http://www.marketsandmarkets.com>. (accedido ene. 20, 2019).
- [2] Sociedad Española de Acústica. Ed., *Glosario de Términos Acústicos*. ISBN: 978-84-87985-22-5. 2012.
- [3] Microflown AVISA, «Clip On Acoustic Pointer for mini-UAVs». <http://www.microflow-avisa.com>. (accedido sept. 10, 2019).
- [4] Microflown AVISA, «Sky Sentry: Acoustic Microdrone Localization System in an Urban Environment». <http://www.microflow-avisa.com>. (accedido sept. 10, 2019).
- [5] B Jacques, P Serge. «Ferret, A small arms' fire detection system: Localization concepts». *Proceedings of SPIE*, vol. 5071, 2003.
- [6] R Kronland-Martinet, T Voinier. «Real-Time Perceptual Simulation of Moving Sources: Application to the Leslie Cabinet and 3D Sound Immersion». *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, Volume 2008, Article ID 849696, Hindawi Publishing Corporation.

DOI:10.1155/2008/849696.

- [7] M Oprea, C Miron. «Physics experiments based on data acquisition the longitudinal acoustic Doppler effect». Romanian Reports in Physics, vol. 68, n.º 3, pp. 1312–1325, 2016.
- [8] B G Fergudon. «A ground-based narrow-band passive acoustic technique forestimating the altitude and speed of a propeller-driven aircraft». J. Acoust. Soc. Am. 92 (3), September 1992. 0001-4966/92/0911403.
- [9] S R Martín, M Genescà, J Romeu, R Arcos. «Passive Acoustic Method for Aircraft States Estimation Based on the Doppler Effect». IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, vol. 50, n.º 2 APRIL 2014. DOI: 10.1109/TAES.2013.120176.
- [10] I F Costa, A Mocellin. «Noise Doppler-Shift Measurement of Airplane Speed». The Physics Teacher, vol. 45, September 2007.
- [11] D C. Reid, A M Zoubir, B Boashash. «Aircraft flight parameter estimation based on passive acoustic techniques using the polynomial Wigner–Ville distribution». J. Acoust. Soc. Am. 102 (1), July 1997. 0001-4966/97/102(1)/207/17.
- [12] «ISO 9613-1 :1993(E). “Acoustics—Attenuation of Sound during Propagation Outdoors—Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere». International Organization for Standardization. Ginebra, Suiza, 1993.
- [13] «ISO 9613-2 :1996(E). “Acoustics—Attenuation of Sound during Propagation Outdoors—Part 2: General Method of Calculation». International Organization for Standardization. Ginebra, Suiza, 1996.
- [14] «Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction». Dinamarca: DELTA, Danish Electronics, Light and Acoustics. AV 1849/00. 2001.
- [15] K Attenborough, K Ming Li, K Horoshenkov. «*Predicting Outdoor Sound*». Taylor & Francis. ISBN: 0-203-08873-5. 2007.
- [16] R J Peppin. «WINDSCREEN INSERTION LOSS IN STILL AIR». Canadian Acoustics, 25 vol. 31 n.º 1, 2003. 2003.
- [17] R N Hosier, P R Donovan, Paul. «Microphone Windscreen Performance». Office of Noise Abatement and Control. U.S. Environmental Protection Agency. NBSIR 79-1599, January 1979. Washington DC, EE UU. 1979.
- [18] R P Hamernik, K D Hsueh. «Impulse noise: Some definitions, physical acoustics and other consideration». J. Acoust. Soc. Am. 90 (1), July 1991. EE UU.
- [19] J R Aguilar, S V. Desai. «Model for Small Arms Fire Muzzle Blast Wave Propagation in Air». Proc. of SPIE, vol. 8184 81840B-1. DOI: 10.1117/12.903043. 2011.

SOBRE EL AUTOR



Seriosha Rodríguez Hernández nació en La Habana, Cuba, en enero de 1974. es graduado de la facultad de ingeniería eléctrica del instituto superior politécnico José Antonio Echeverría en la especialidad de Ingeniero Electricista (1997, La Habana, Cuba). en el propio instituto obtuvo un diplomado en sistemas electrónicos (2000) y una Maestría en Electrónica (2003). actualmente trabaja en el Centro de Investigación y Desarrollo Técnico, CIDT y lleva más de 14 años directamente vinculado al desarrollo de sistemas de instrumentación virtual con marcado énfasis en el procesamiento de señales de audio. Ha cursado varios posgrados, participado en eventos nacionales e internacionales, impartido cursos y conferencias, y realizado varias publicaciones relacionadas con el tema de la instrumentación virtual.