

En Profundidad

Sistemas de detección de fuego enemigo basados en cámaras de infrarrojo medio no refrigeradas de alta velocidad

Germán Vergara Ogando, New Infrared Technologies.

Palabras clave: detectores de PbSe en rango MWIR no refrigerados, alta velocidad, detección de disparos de armas ligeras, destello de boca de armas ligeras.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 2.2.2; MT 4.3.3.

Introducción

Los requisitos operativos de la mayoría de los Ejércitos avanzados piden la instalación de sistemas de detección de fuego enemigo HFI (*Hostile Fire Indication*) y HFDS (*Hostile Fire Detection Systems*) en todas las plataformas terrestres y aéreas de ala móvil utilizadas en misiones de patrulla y apoyo. El uso de este tipo de sistemas se hace especialmente necesario en aquellas misiones militares que se desarrollan en escenarios complejos y dinámicos tales como áreas urbanas y/o densamente pobladas.

Por su relevancia operativa son muchos los proyectos y estudios realiza-

dos en los últimos años con el objetivo de analizar la problemática y las necesidades tecnológicas necesarias para satisfacer los requisitos exigidos a los sistemas HFI y HFDS. En el proyecto MUSAS “*Multi Sensor Anti Sniper System*” de la Agencia Europea de Defensa (*European Defence Agency - EDA*) y liderado por la empresa española GMV, se estudió en profundidad la problemática asociada a la detección de disparos de armas ligeras en escenarios dinámicos y las posibles soluciones tecnológicas existentes y futuras. Tanto en MUSAS como en la mayoría los estudios realizados hasta ahora se concluye lo mismo: no existe un único dispositivo sensor o técnica que satisfaga plenamente las necesidades operativas exigidas por los sistemas HFI Y HFDS, pero una combinación de técnicas de detección debidamente tratada y fusionada puede ser una excelente solución al problema de la detección de fuego enemigo.

El disparo de un arma convencional lleva asociado una fenomenología común: 1) emisión intensa de radiación electromagnética, usualmente en una banda espectral ancha que comprende UV (0,2 - 0,45 micras), VIS (0,45 - 0,7 micras), NIR (0,7 - 3 micras), MWIR (3 - 5 micras) y LWIR (> 8 micras) proveniente de la boca del arma (*muzzle flash*) y/o de los propulsores (*boost*) en el caso de misiles; 2) una onda de presión sónica y 3) un proyectil con carga dirigido hacia el blanco. Teniendo esto en cuenta se concluye que los sistemas de detección de fuego enemigo deben estar provistos de sensores capaces de detectar uno o varios de estos fenómenos a la vez que discriminar los mismos de otro tipo de señales existentes en la escena cuya presencia pueda llegar a originar falsas alarmas.

Los requisitos clave a la hora de diseñar sistemas HFI y HFDS son: tiempos de detección muy cortos y la localización de la amenaza. Los detectores de luz constituyen un complemento extraordinario a otro tipo de detectores muy extendidos por la madurez de su tecnología como son los acústicos, pero cuyos tiempos de detección y precisión en la localización en escenarios complejos son limitados. El uso de detectores de radiación electromagnética o fotónicos es una buena solución para la aplicación. Desde el UV hasta el IR lejano, este tipo de detectores proporcionan dos ventajas importantes: 1) son muy rápidos y 2) son capaces de suministrar información espacial con buena resolución angular.

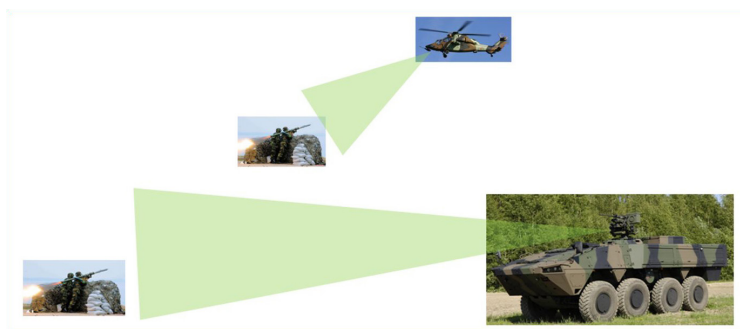


Fig. 1. Sistemas de detección de fuego enemigo HFI y HFDS aplicados a vehículos terrestres y helicópteros (Fuente: New Infrared Technologies).

ARMAS A DETECTAR	PLATAFORMAS A PROTEGER	SENSORES
<ul style="list-style-type: none"> Ligeras RPGs IEDs (EFPs etc.) Misiles (TOW, ATGM etc.) Artillería Cohetes Mortero 	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos terrestres (MBT, 8x8 etc.) Helicópteros UAVs Personal 	<ul style="list-style-type: none"> UV Visible NIR MWIR refrigerados MWIR no refrigerados Acústicos

Tabla 1: Principales actores involucrados en el diseño y desarrollo de sistemas HFI según un estudio de la OTAN (Fuente: NIT).

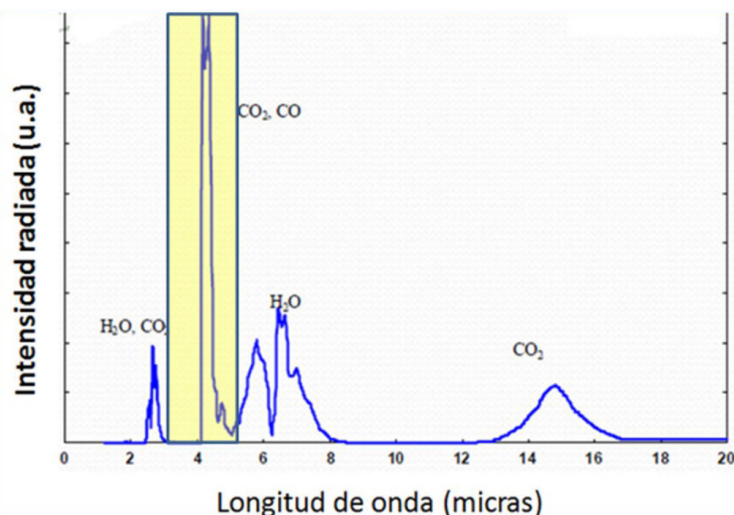


Fig. 2. Emisión típica de la combustión de una turbina y las especies gaseosas producidas. El área amarilla corresponde a la región MWIR (3-5 micras) (Fuente: New Infrared Technologies).

ventajosa en el proceso de reducción de falsas alarmas. En la figura se pueden ver las firmas espectrales normalizadas del destello de boca de un arma estándar², de un cuerpo negro a 5.000 °C que simularía objetos que reflejan la luz del Sol, y de un cuerpo negro a 25 °C correspondiente a la emisión de los materiales a temperatura ambiente que constituyen la escena. Las firmas están normalizadas para enfatizar la distribución de energía. La región de interés, en amarillo, es la correspondiente al MWIR. En ella la emisión relativa proveniente del disparo del arma es máxima frente a la contribución solar y la radiación infrarroja del fondo. A la vista de la figura cabe decir que un filtrado adecuado permite maximizar la señal del disparo frente al resto de señales existentes en la escena. Las técnicas de discriminación espectral son muy ventajosas en la banda del MWIR y es por ello que dicha banda es la más recomendable para la detección de fuego enemigo.

Necesidad de rapidez

Hay que tener muy presente que en aplicaciones como la que nos ocupa, sistemas HFI y HFDS, el tiempo es una variable de vital importancia por razones obvias. Desde el punto de vista operativo sobra decir que se necesita detectar la amenaza lo antes posible. Cada milisegundo es oro. De la misma forma cabe decir que la rapidez de detección también es importante desde el punto de vista de la fenomenología. La duración y la evolución temporal del destello de radiación producido durante el disparo son muy cortas. El destello asociado al disparo se caracteriza por un aumento rápido de la intensidad radiante seguida por una disminución más lenta de la misma. En el caso de un disparo de arma ligera, modelando la evolución de la temperatura y presión de los gases de salida se puede conocer la evolución de la intensidad radiante en función del tiempo³.

En la Figura 4 se representa el resultado de la simulación para el caso de un

² [S Carfagno, Spectral Characteristics of Muzzle Flash, Washington, DC: US Army Material Command, AD81532, 1967]

³ [G. Klingenberg and J. Heimerl, Gun Muzzle Blast and Flash, Reston, VA: American Institute of Astronautics and Aeronautics, 1992.]

La tabla 1 corresponde a un estudio realizado por la OTAN¹ en 2004. En ella se resumen los tres grupos principales de actores a tener en cuenta a la hora de diseñar y desarrollar un sistema de detección de fuego enemigo HFI y HFDS.

El presente trabajo expone el gran potencial que presenta la utilización para los sistemas HFI y HFDS de uno de los sensores de la columna derecha de la tabla: los sensores MWIR no refrigerados y rápidos. De la misma forma se expone la relevancia a nivel internacional que hoy tiene España en el desarrollo de este tipo de tecnología.

Detectores de infrarrojo medio muy rápidos y no refrigerados

A la vista de la columna derecha de la tabla 1, la OTAN recomienda utilizar diversos tipos de detectores de luz para lo sistemas HFI. Entre ellos destacan los detectores sensibles al MWIR y específicamente habla de los no refrigerados. La primera cuestión que se aborda en el artículo es explicar las razones por las que entre la pléyade de detectores fotónicos existentes una familia tan particular y poco común como es la de los MWIR rápidos y no refrigerados es idónea para los sistemas HFI y HFDS.

¹ [“Infrared Detection and Geolocation of Gunfire and Ordnance Events from Ground and Air Platforms” Myron Pauli, William Seisler, Jamie Price, Al Williams, Carlos Maraviglia, Robert Evans, Stanley Moroz, M. C. Ertem, Eric Heidhausen, and Duane A. Burchick]

A continuación se explican las razones técnicas más relevantes:

Necesidad de tener sensibilidad en el Infrarrojo medio MWIR (3-5 micras)

¿Por qué sensores de infrarrojo medio? La principal razón es que una gran cantidad de radiación electromagnética emitida por las armas de fuego y misiles durante sus fases de disparo (*boost*) y crucero (*sustain*) se encuentra en la parte del espectro correspondiente al IR medio (1-5 micras). Específicamente en las bandas correspondientes a la emisión de H₂O (centrada en 2.9 micras) y CO₂ (centrada en 4.3 micras) calientes. En la figura 2 se presenta el espectro de emisión típico de la combustión de la turbina de un misil y las especies gaseosas responsables de la misma. Se observa una emisión muy intensa en la región MWIR (3-5 micras) proveniente del CO₂ y CO calientes producidos de la combustión.

La señal emitida durante el disparo es parte del proceso de detección, pero no lo es todo. Otra parte relevante lo constituye el escenario. En la escena de disparo se suelen encontrar dos fuentes de radiación importantes: las reflexiones solares y la radiación emitida por los cuerpos que componen la escena. Ambas fuentes de luz generan señales no deseadas (“clutter”) que dificultan el proceso adecuado de detección del disparo con una baja probabilidad de falsa alarma. La región del espectro MWIR es también

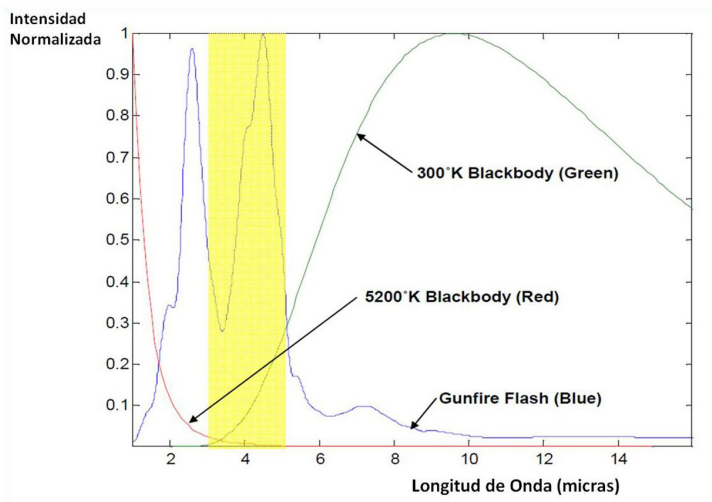


Fig. 3. En la región espectral del MWIR (3-5 micras/área amarilla) la discriminación espectral es óptima (Fuente: Ver referencias [1]).

No refrigerado

La idea es que el mayor número de plataformas que necesiten sistemas HFI y HFDS los tengan instalados y operativos o si fuera posible en todas. Es necesaria una gran cantidad de unidades, lo que en la práctica traduce en la necesidad de avanzar en sensores y tecnologías denominadas "SWaP-C", acrónimo utilizado para sensores pequeños, con poco consumo y, sobre todo, bajo coste (*Small Size, Weight and Power - Cost*).

Desgraciadamente, en el caso de los detectores sensibles en la banda espectral MWIR, SWaP-C es un requisito muy restrictivo. La razón es que la gran mayoría de los detectores existentes que trabajan en MWIR necesitan ser refrigerados a temperaturas muy bajas, por debajo de los $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$, para obtener la sensibilidad que la aplicación requiere. Este hecho impone el uso de sistemas criogénicos lo que en la práctica, constituye una gran limitación: los sistemas criogénicos son caros, tienen un impacto negativo en la fiabilidad, la vida de operación, el consumo y el volumen de los sistemas y requieren un mantenimiento muy costoso. El desarrollo de detectores sensibles en el MWIR que no necesiten refrigeración para trabajar es fundamental para avanzar en los sistemas HFI y HFDS del futuro.

El detector

Siguiendo la línea argumental, lo que se desprende hasta ahora de los requisitos necesarios es que los sistemas de detección de fuego enemigo

disparo de un rifle. Se observa que la duración del evento es menor de 2 ms lo que, como veremos más adelante, condiciona en gran medida las características del detector de imagen IR a emplear. En el caso de un misil los tiempos de empuje (*boost*) es de unas decenas de milisegundos mientras que los tiempos de crucero (*sustain*) son más largos, del orden de muy pocos segundos pero mucho menos intensos. Los sistemas HFI deberán detectar el disparo cuanto antes, en fase de empuje cuando la emisión es muy intensa pero muy breve. La aplicación requerirá tiempos de detección efectivos por debajo de unos pocos milisegundos para tener tiempo de realizar maniobras disuasorias o utilizar contramedidas.

Hay dos factores que limitan la resolución temporal de un detector de infrarrojo de imagen:

- La constante de tiempo del propio detector debe ser del orden o menor que la propia duración del evento. La figura 5 resume perfectamente la limitación impuesta por esta condición. Se observa la curva de pérdida de energía de destello útil sobre el detector frente a su tiempo de respuesta. Esta es la razón principal por la que los detectores térmicos de banda larga (8-12 micras) no refrigerados de IR no son adecuados para la aplicación, pues tienen constantes de tiempo típicas por encima de 10 ms.
- El tiempo impuesto por la electrónica de lectura de la cámara es otro de

los factores importantes a tener en cuenta. La frecuencia de trabajo de la electrónica de lectura de una cámara de infrarrojo convencional se encuentra en el orden de las decenas de MHz. Para tasas de toma de imágenes del orden de los 100 Hz los tiempos de integración y transmisión de datos pueden resultar en una pérdida del registro de eventos, sobre todo si estos son muy rápidos como es el caso del destello de boca asociado al disparo de un arma ligera (~ 1.5 ms). Es necesario tener tiempos de integración muy cortos y tasas de imágenes muy altas para que esto no ocurra (> 400 Hz).

En consecuencia, los sistemas HFI y HFDS requieren detectores muy rápidos con constantes de tiempo cortas y tasas de imagen muy altas.

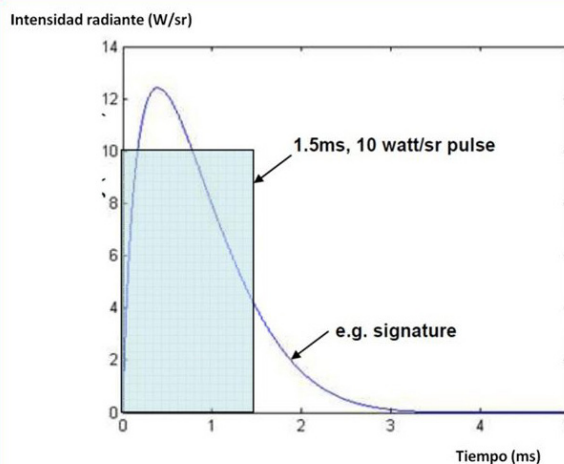


Fig. 4. Evolución temporal de la emisión radiante de un disparo de arma ligera estándar (Fuente: Ver referencias [2]).

necesitan de sensores sensibles en la banda espectral MWIR, que funcionen sin refrigeración criogénica, que sean pequeños y de bajo coste ("SWaP-C"), que tengan constantes de tiempo cortas, por debajo del milisegundo, y que sean capaces de proporcionar altas tasas de imagen (preferiblemente por encima de los 400 Hz).

Al seleccionar las tecnologías infrarrojas existentes que cumplan todos los requisitos descritos en el párrafo de arriba, el resultado es que la lista de posibles candidatos es una lista muy corta. Tan corta como que, a día de hoy, solo hay un posible candidato: los detectores de PbSe policristalino. Este es de los escasos materiales que tienen sensibilidades altas en el MWIR sin necesidad de refrigeración criogénica y es un detector cuántico (muy rápido). En la tabla 2 se resumen las tecnologías infrarrojas existentes en la actualidad y su cumplimiento los requisitos de la aplicación.

El PbSe se conoce desde hace mucho tiempo, su tecnología estándar fue desarrollada por los norteamericanos en los años 60 y se ha utilizado muy frecuentemente en aplicaciones de defensa e industriales. Durante varios años el Ministerio de Defensa de España ha investigado en este material y como resultado desarrolló una nueva tecnología para fabricar PbSe policristalino con ventajas muy importantes respecto del método tradicio-

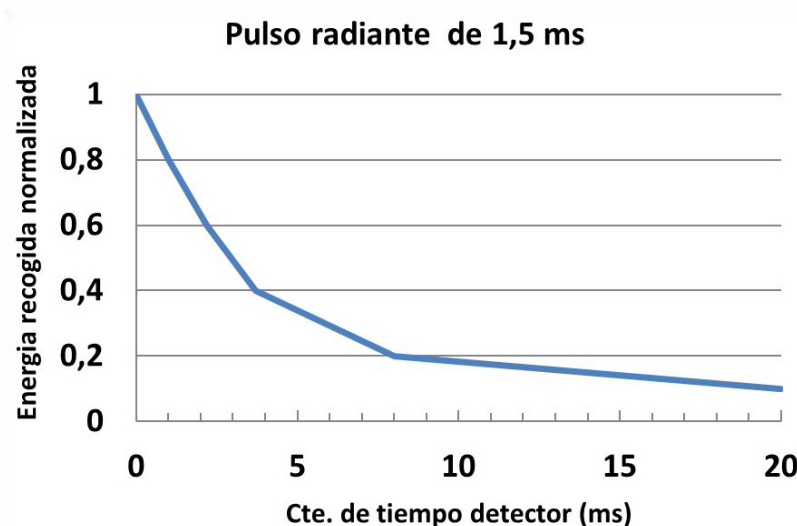


Fig. 5. Curva de energía normalizada recogida por el pixel frente a la constante de tiempo del detector para un pulso de luz incidente de 1.5 ms de duración (Fuente: New Infrared Technologies).

nal desarrollado por los norteamericanos en los años 60.

La empresa española New Infrared Technologies S.L. (NIT) en base a esa tecnología y a nuevos avances y desarrollos realizados en los últimos años, recientemente ha lanzado el primer detector SWaP-C sensible en el MWIR del mercado. La tecnología de NIT ha sido reconocida internacionalmente como la tecnología de PbSe más avanzada del mercado y una de las tecnologías infrarrojas no refrigeradas más interesantes en la actualidad para múltiples aplicaciones militares e industriales.

Estado del arte en el desarrollo de detectores de PbSe

Son varios los programas en marcha que el Ejército norteamericano tiene para el desarrollo de detectores de imagen de PbSe para la aplicación HFI y HFDS. Northop Grumman Corporation (NGC) y BAE Systems son las empresas norteamericanas que participan en los mismos. Ambas empresas han hecho grandes esfuerzos y han afrontado la problemática del PbSe de una forma diferente.

En el caso de BaE Systems, su desarrollo se ha basado en un detector de

Tecnología Infrarroja	MWIR	Compatible CMOS	SWaP - C	No Refrigerado	Rápido	Bajo coste	Líderes
CMT							EEUU, FR, UK, Ge etc.
InSb							EEUU, Israel, etc
PbSe							España, EEUU
InGaAs							EEUU, FR, UK, Ge, Israel, Be etc...
Thermal: VOx/a-Si/BST etc.							EEUU, FR, UK, Israel Ge etc.

Tabla 2: Comparativa de detectores (Fuente: NIT).

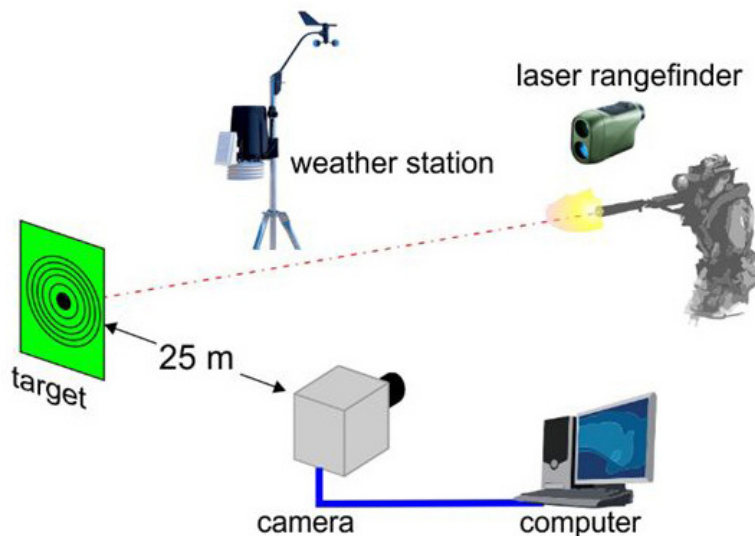
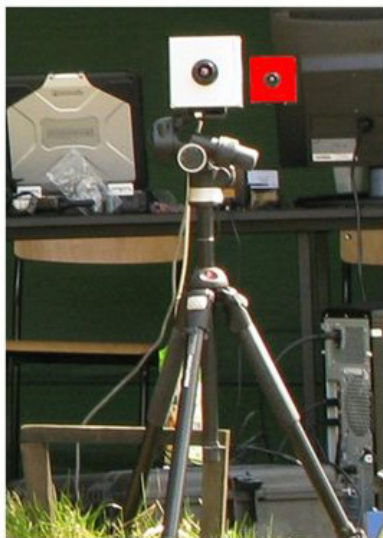


Fig. 6. Sistema experimental de cámaras de PbSe no refrigerado de NIT en la detección de disparos de armas ligeras (Fuente: Ver referencias [3]).

imagen de 100x100 píxeles hibridado con la correspondiente electrónica CMOS, habiéndose probado prototipos con éxito en pruebas de campo.

Por su parte NGC ha hecho un gran esfuerzo en desarrollar la tecnología hasta el punto de ser capaces de depositar el material sensor, PbSe, directamente sobre la electrónica CMOS de lectura (integración monolítica) mediante fase húmeda CBD (*Chemical Bath Deposition*). En el último simposium SPIE-DSS en Baltimore, NGC presentó un detector de PbSe de 360x240 píxeles sobre dos etapas TEC (-60°C) capaz de alcanzar unas excelentes prestaciones (NETDs de 30 mK trabajando a 400 Hz). Estas prestaciones son extraordinarias para un detector no refrigerado que trabaja en MWIR. Hasta la fecha se han procesado detectores sobre obleas de 75 mm. Dado que las *foundries* convencionales de electrónica CMOS trabajan sobre obleas de al menos 200 mm de diámetro se necesitaría dar el paso a la industrialización para pasar a fabricar sobre sustratos más grandes.

Por último cabe destacar la tecnología de PbSe de NIT. Esta tecnología es capaz de depositar el PbSe mediante fase vapor VPD (*Vapour Phase Deposition*) sobre obleas de 200 mm CMOS (integración monolítica). La empresa ha desarrollado y comercializa un detector monolítico de PbSe de 80x80 píxeles capaz de

proporcionar 2.000 imágenes por segundo. Un grupo de la Universidad Militar de Polonia ha realizado pruebas de disparos con cámaras de la familia Matrix y Tachyon de NIT [3]. Los resultados han sido muy satisfactorios siendo capaces de detectar el destello de boca de un AK 47 a más de 350 m en operación no refrigerada. En el caso de amenazas para vehículos terrestres tales como RPGs, misiles TOW, ATGM, etc. las distancias de detección estarían por encima de los 2 Km dependiendo del tipo de amenazas y las condiciones ambientales.

En la actualidad NIT se encuentra desarrollando un nuevo detector de 128x128 píxeles con 50 micras de pitch que sin duda abrirá nuevas perspectivas a los sistemas HFI y HFDS del futuro. El nuevo detector tendrá un pixel de dimensiones reducidas (50x50 micras) y sus prestaciones serán mejoradas respecto a la actual familia Tachyon de NIT.

Conclusiones

Los nuevos retos y misiones a los que se enfrentan nuestros ejércitos requieren que las plataformas terrestres y aéreas de alas móviles operen en escenarios muy complejos con una gran diversidad de amenazas. Los sistemas de detección de fuego enemigo serán una parte importante de los sistemas de protección de dichas plataformas.

La detección de disparos de armas ligeras es una tarea compleja que necesitará de la fusión de la información suministrada por una *suite* de sensores distribuidos en los vehículos y plataformas a proteger. Entre los sensores a utilizar para la aplicación hay que destacar por su adecuación a las características específicas de la fenomenología de un disparo, los sistemas sensibles en la banda espectral MWIR, que trabajen sin refrigerar y que tengan una respuesta muy rápida.

El PbSe policristalino es el material conocido cuyas características se ajustan mejor a esta aplicación, siendo España un actor principal en el mundo del desarrollo de esta tecnología.

Referencias

- [1]. S Carfagno, Spectral Characteristics of Muzzle Flash, Washington, DC: US Army Material Command, AD81532, 1967.
- [2]. G. Klingenberg and J. Heimerl, Gun Muzzle Blast and Flash, Reston, VA: American Institute of Astronautics and Aeronautics, 1992
- [3]. Universidad Militar de Tecnología de Polonia. Presentación del trabajo "Technology of uncooled fast polycrystalline PbSe focal plane arrays in systems for muzzle flash detection" realizada en mayo de 2014 en el Simposio DSS-SPIE (Baltimore)