

En Profundidad

Caracterización de explosivos detonados en el rango de THz

David Etayo, Itziar Maestrojuan, Jorge Teniente, Iñigo Ederra, Ramón Gonzalo, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad Pública de Navarra

Palabras clave: Análisis forense, C-IED, identificación, explosivos.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 4.1.2.

Introducción

Durante los últimos años la banda de frecuencias de terahertzios (THz)-margen de frecuencias entre el final de la banda de microondas y el infrarrojo (0.1THz a 10THz) - ha experimentado un desarrollo sin precedentes. Ha pasado una década desde que emergieron los primeros sistemas pulsados de THz para obtención de imágenes (*imaging*) y desde entonces se han hecho grandes progresos en el *imaging* a frecuencias de THz, en particular en milimétricas y sub-milimétricas, en distintos ámbitos. Así, nos encontramos sistemas de *imaging* en aplicaciones de seguridad, mediante sistemas no invasivos de exploración para la detección de objetos peligrosos, tests de materiales, análisis médicos y biológicos, etc. [1]. De todas estas aplicaciones, parece que las relacionadas con la seguridad son las que se están convirtiendo en las más atractivas.

Dentro de estas aplicaciones, uno de los desafíos que existen en cualquier sistema de detección es la identificación en tiempo real de objetos potencialmente peligrosos, como armas o explosivos escondidos bajo la ropa. Los sistemas clásicos utilizados hasta ahora en las aduanas y en controles de seguridad no son capaces de satisfacer los cada vez mayores y más numerosos requisitos de seguridad, especialmente con respecto al alto grado de fiabilidad requerido. Esto implica una muy alta tasa de detección de materiales peligrosos y una muy baja probabilidad de falsas alarmas. Los sistemas actuales de

exploración pueden clasificarse en dos grandes grupos. Por un lado están aquellos que usan tecnología de rayos-X mientras que por otro se encuentran los que usan tecnología de THz, en particular a frecuencias milimétricas. El uso de rayos-X implica una exposición a radiación ionizante, lo cual es un tema que genera mucho debate [2]. De hecho, la Comisión Reguladora (UE) N° 1141/2011 de 10 Noviembre de 2011 establece que en

los aeropuertos de la UE “sólo los sistemas de exploración que no usen radiación ionizante se pueden incluir en la lista de métodos permitidos para la exploración de pasajeros con fines de seguridad”. Por otro lado, la tecnología de frecuencias milimétricas sí que ha sido uno de los métodos incluidos en la lista anteriormente citada. Estos sistemas tienen la ventaja de que la ropa es transparente y, por lo tanto, se pueden detectar objetos ocultos



Fig. 1. Fotografía de (a) contenedor preparado para la detonación y (b) después de la detonación. (Fuente: UPNA).

bajo ella. La posibilidad de exploración de personas sin exponerlas a los peligrosos rayos-X es lo que ha dado lugar a que se desarrollen diferentes prototipos y productos usando tecnologías de *imaging* y detección pasivas a frecuencias milimétricas. No obstante, existen todavía retos tecnológicos fundamentales que abordar antes de que se puedan obtener sistemas en tiempo real, compactos, seguros, de relativamente bajo coste y de alta sensibilidad, en esta banda de frecuencias.

Por otro lado, la espectroscopia en THz [3-5] proporciona una identificación rápida y sencilla de diferentes sustancias, como explosivos [6] o drogas [7], los cuales presentan diferentes comportamientos espectrales (*fingerprints*) que permiten su caracterización espectral. Distintos autores han medido la absorbancia de diferentes tipos de explosivos, con el objetivo de desarrollar y completar una base de datos en el rango de THz (<http://thzdb.org/>). Estos estudios incluyen, entre otros, varios explosivos comunes como son: 1,3,5-trinitroperhidro-1,3,5-triacina (RDX) [8-11], 1,3-Dinitrato-2,2-bi(nitratometil) propano (PETN) [12] o 1-metil-2,4,6-trinitrobenzeno (TNT) [13]. Estos trabajos han caracterizado espectralmente en el rango de los THz a nivel de laboratorio (estudio forense) [14] muestras de explosivos comerciales no detonados.

Este artículo presenta un estudio de la caracterización electromagnética de varios explosivos detonados mediante la técnica de espectroscopia en el dominio del tiempo en el rango de THz (THz-TDS). Este trabajo constituye el primer análisis espectral en el rango de los THz de explosivos detonados. Los resultados son fruto de la colaboración directa con la Guardia Civil. El objetivo final es crear una base de datos del comportamiento espectral en el rango de THz de diferentes explosivos, detonados y no detonados, que ayudará a la Guardia Civil a identificar el origen y el tipo de explosivo en la lucha antiterrorista.

La Guardia Civil proporcionó muestras no detonadas de PETN, TNT y RDX. Posteriormente, en las instalaciones de la Universidad Pública de Navarra (UPNA), y siguiendo un estricto protocolo, los explosivos mencionados

anteriormente fueron detonados por los propios expertos de la Guardia Civil de la Unidad de Pamplona. La caracterización espectral mediante THz-TDS se realizó en los laboratorios de la UPNA. Los resultados de esta caracterización espectral fueron comparados con los resultados obtenidos de muestras no detonadas [13]. En concreto, los parámetros que se estudiaron fueron el índice de refracción y el espectro de absorbancia en el rango 0,1-3 THz.

Detonación de los explosivos

La primera parte del proceso consistió en preparar los explosivos para la detonación. Siguiendo las indicaciones de la Guardia Civil, se llenó una caja de plástico con arena; a continuación, se introdujo el detonador junto con el explosivo que se iba a detonar (ver Fig. 1a). Finalmente, se procedió a la explosión controlada mediante la activación del detonador a través de una corriente eléctrica. Este proceso se repitió para cada uno de los explosivos bajo estudio. Es importante remarcar que dicho proceso fue realizado por los expertos en explosivos de la Guardia Civil de Pamplona.

Después de la detonación (ver Fig. 1b) se recogieron muestras de arena

contaminada, es decir, una mezcla de la arena quemada por la explosión y restos tanto del explosivo como del detonador. Estas muestras fueron caracterizadas en el laboratorio para detectar trazas (frecuencias de absorción) de los explosivos detonados en el rango de los THz. Además, con el objetivo de eliminar la influencia de la mezcla básica sin explosivo, se analizó el comportamiento espectral en THz de una muestra formada únicamente por la arena quemada por la explosión del detonador y los restos existentes del propio detonador. Esta mezcla constituye la "referencia".

Preparación de las muestras

Se fabricaron varias pastillas con el objetivo de poder realizar el análisis espectral de los explosivos detonados. En este caso, se mezcló la muestra obtenida tras la detonación con polvo de polietileno (PE) y se comprimió en una prensa hidráulica (10 toneladas) para formar las pastillas que posteriormente pudieran introducirse en el sistema de medida. Las cantidades mezcladas fueron 250 mg de PE y 100 mg de arena contaminada con explosivo detonado, de forma que se obtuvieron pastillas de 350 mg [13].

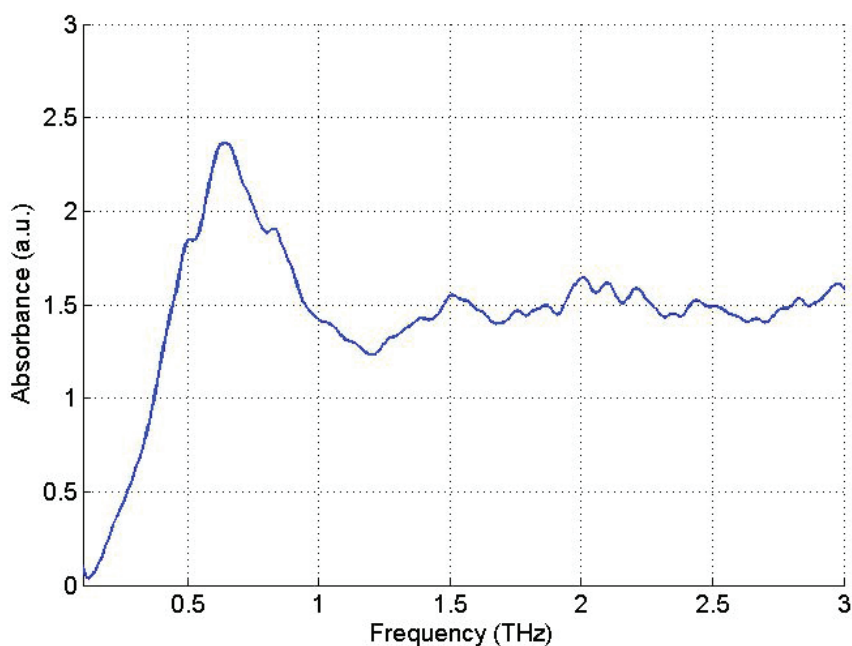


Fig. 2. Espectro de absorción en unidades arbitrarias de la "referencia" en el rango de THz. (Fuente: UPNA).

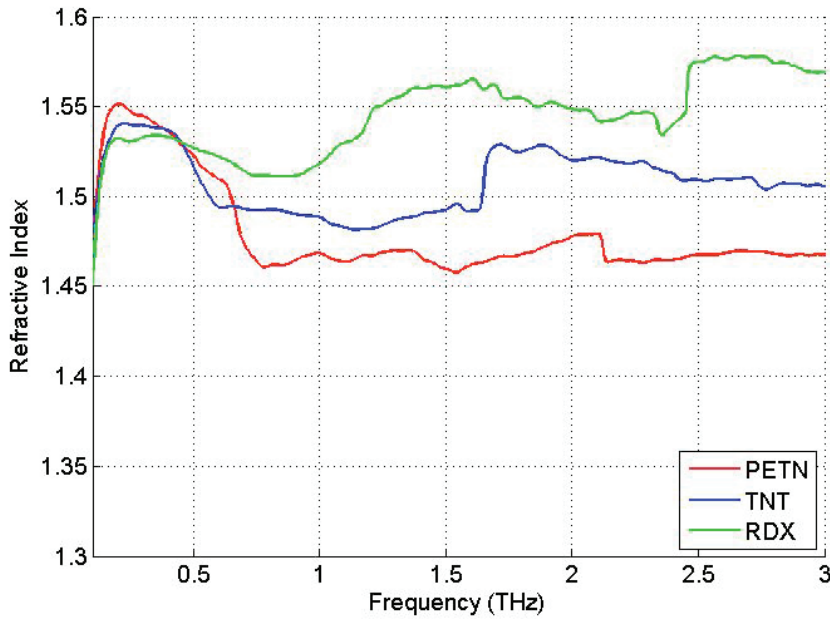


Fig. 3. Índices de refracción de los explosivos detonados. (Fuente: UPNA).

antes de la detonación [14]. Por el contrario, el índice de refracción del RDX presenta diferencias mayores. Este hecho proviene de la alteración producida en la estructura cristalina que forma el RDX, que se ve claramente modificada después de la explosión.

Finalmente, cabe destacar que el cambio en la tendencia del índice de refracción alrededor de la frecuencia de absorción de 0,8 THz (ver Fig. 2) es menor en el caso del RDX (ver Fig. 3) que en los casos de los otros explosivos. Por lo tanto, el valor del pico en el espectro de absorción es menor, tal y como se muestra en la Fig. 5.

Es importante destacar que, tal y como se describe en [14], la contribución del polietileno a la hora de determinar el índice de refracción de los “explosivos detonados” ha sido eliminado [15].

Absorbancia de los explosivos detonados

La figura 5 muestra los resultados de la espectroscopia THz-TDS de las diferentes muestras de explosivos. Como se puede observar, el pico de absorción debido al detonador aparece situado a 0,8 THz en cada una de las gráficas (marcado con un

Se fabricaron dos tipos diferentes de pastillas; el primero estaba formado por las muestras de explosivos detonados y el segundo con la referencia.

En la figura 2 se puede ver la respuesta espectral de la referencia, la cual presenta un pico significativo a 0,8 THz. Este pico de absorción es una frecuencia característica (*fingerprint*) de la combinación arena quemada/detonador y, tal y como se muestra a continuación, aparece en los diferentes análisis espectrales que se han realizado con las muestras de explosivos.

Explosivos detonados: caracterización espectral

Índice de refracción

La primera propiedad electromagnética de las muestras que se caracterizó fue el índice de refracción (el procedimiento seguido se describe en [14]). Dicho índice presenta intervalos de valor cons-

tante (ver Fig. 3) separados por cambios abruptos, los cuales, tal y como se describe en la siguiente sub-sección, están directamente relacionados con los correspondientes picos de absorción que presentan las muestras.

Como se puede observar en la Tabla 1, los índices de PETN y TNT son muy similares a los obtenidos

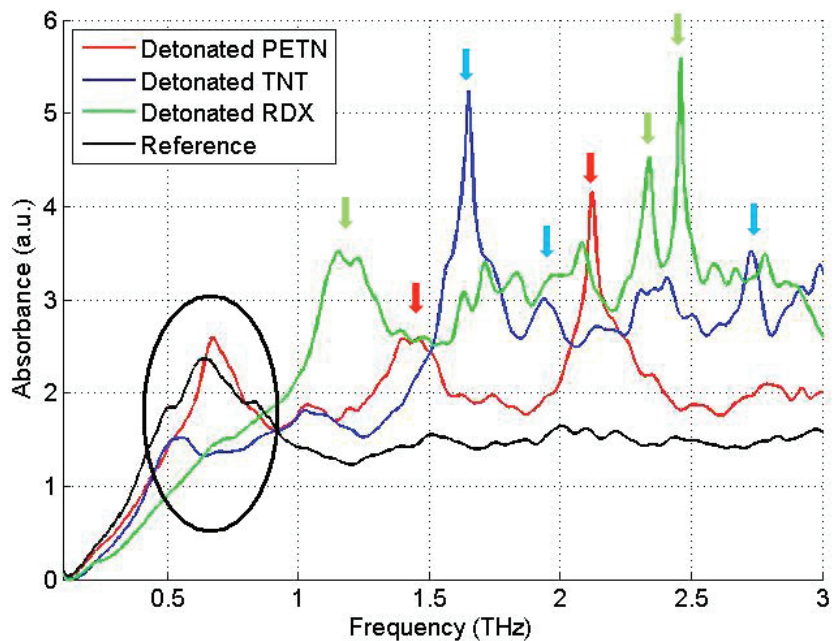


Fig. 4. Absorbancia en unidades arbitrarias de los explosivos detonados en el rango de los THz. (Fuente: UPNA).

Índice de refracción		
Explosivo	Antes detonación	Después detonación
PETN	1,44	1,46
TNT	1,46	1,50
RDX	2	1,55

Tabla 1. Índice de refracción. (Fuente: UPNA).

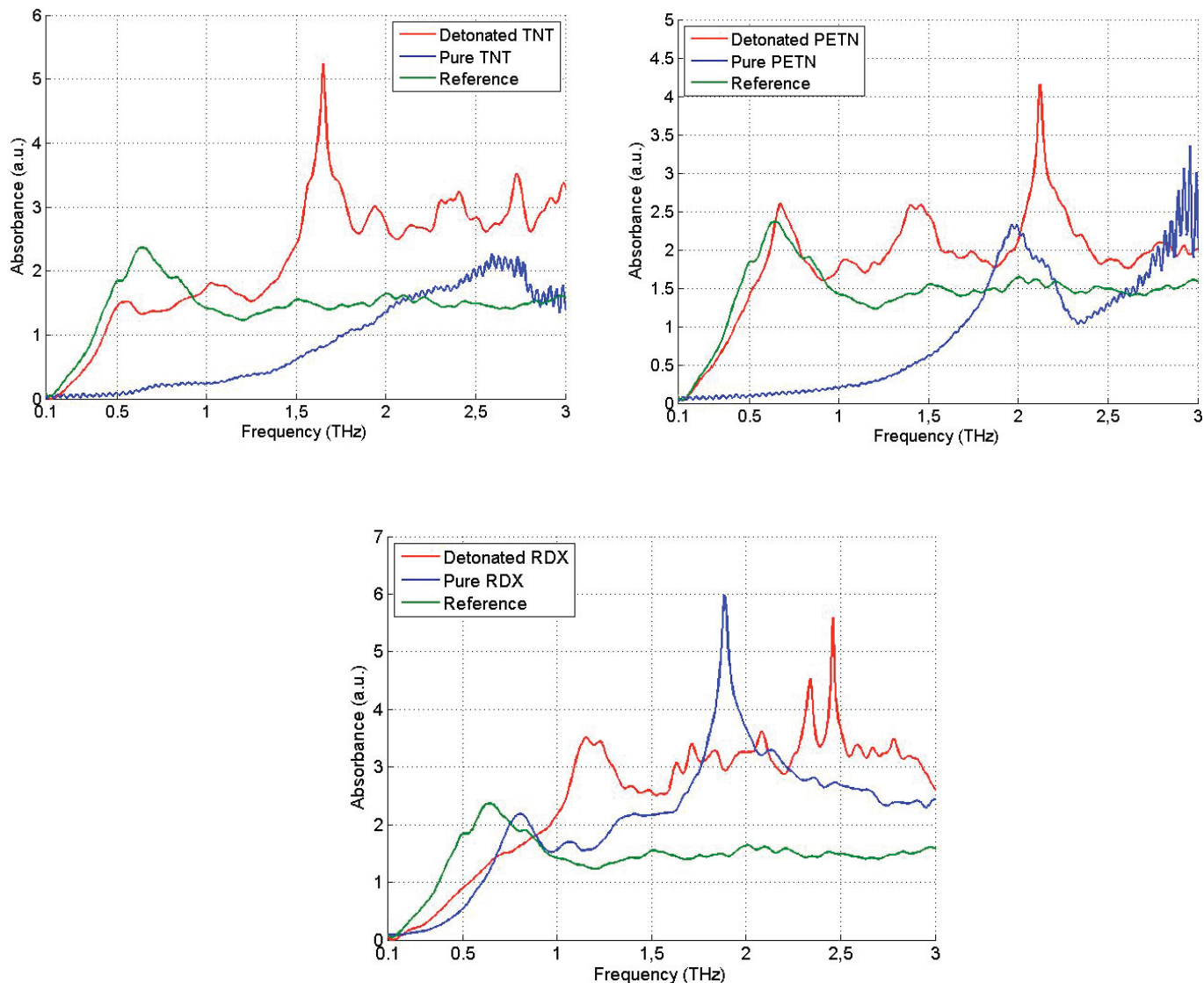


Fig. 5. Comparativa de la respuesta espectral en el rango de THz de los explosivos antes y después de la detonación (a) TNT, (b) PETN y (c) RDX. (Fuente: UPNA).

círculo negro). En el caso del PETN detonado se aprecian claramente dos frecuencias de resonancia (1,45 y 2,15 THz). Es importante destacar que únicamente se van a considerar como picos de absorbanza característicos aquellos situados alrededor de las frecuencias de resonancia donde se aprecian cambios de tendencia del índice de refracción (ver Fig. 3). Este procedimiento se ha seguido para caracterizar todos los explosivos; por lo tanto, el resto de picos de absorción del espectro no se han tenido en consideración [14], [16].

El TNT detonado presenta varios picos de absorción (1,7, 1,95 y 2,7

THz). Estos son las resonancias que están situadas en las frecuencias donde se observan los cambios de tendencia del índice de refracción.

Los picos principales de absorbanza del RDX están situados en 2,3 y 2,45 THz. Además, también aparecen picos en torno a 1,2 THz.

Comparación de absorbanza

Con el fin de comparar estos resultados con los obtenidos para el caso de los mismos explosivos pero en su forma original, en la Tabla II se muestran las frecuencias de absorbanza de los explosivos no detonados [14] y las de los explosivos detonados.

Como se puede ver en dicha Tabla, existen diferencias apreciables entre ambos.

Frecuencias de absorción		
Explosivo	No-detonado (thz)	Detonado (thz)
PETN	2;2,8	1,45; 2,15
TNT	2,1	1,55;1,95; 2,75;
RDX	0,8; 1,08; 1,3; 1,95; 2,2	1,2; 2,4; 2,5

Tabla 2. Frecuencias de absorción. (Fuente: UPNA).

Estas diferencias se producen fundamentalmente debido a las reacciones químicas ocurridas durante el proceso de detonación que modifican la estructura cristalina de los explosivos. De todas formas, la comparativa de las diferencias químicas entre los explosivos antes y después de la detonación se encuentra fuera del objetivo de este trabajo.

Los resultados presentados en la figura 5 y resumidos en la Tabla II indican claramente que las frecuencias características de cada uno de los explosivos permiten su identificación unívoca en el rango de los THz.

Finalmente, se presenta la comparativa espectral en el rango de THz de los

explosivos estudiados (PETN, TNT y RDX) en ambos casos, antes y después de la detonación, con el objetivo de comprobar, además de las diferencias observadas en los picos de absorbancia, que el comportamiento espectral (*fingerprint*) es totalmente diferente (ver Fig. 7).

Conclusiones

El estudio ha comprobado que cada explosivo presenta una huella espectral o *fingerprint* única que se puede utilizar para su identificación inequívoca. Además, se ha demostrado claramente que los espectros de absorbancia en el rango de THz son diferentes en el caso de los explosivos detonados y no detonados.

Por tanto, se puede decir que el uso de la espectroscopia en el rango de

THz para la detección e identificación de materiales críticos, en este caso explosivos detonados, abre nuevas posibilidades para las fuerzas de seguridad en la lucha antiterrorista.

Estos resultados constituyen la primera base de datos de explosivos detonados, que puede ser utilizada en el futuro para estudios forenses en la lucha antiterrorista para la determinación del explosivo utilizado. De todos modos, la transferencia de estos resultados hacia el campo de la identificación de explosivos en tiempo real mediante la obtención de imágenes en el rango de los THz requiere de un desarrollo tecnológico de más envergadura.

Para más información puede consultar www.unavarra.es.

Referencias

[1] IEEE 2011, Inaugural Issue of IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY (September 2011).

[2] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION.... on the Use of Security Scanners at EU airports. Brussels, COM(2010) 311/4.

[3] Hangyo M, Nagashima T, Nashima S., "Spectroscopy by pulsed terahertz radiation", Meas. Sci. Technol., Vol 13, Nº 11, 2002.

[4] Palka N., "Spectroscopy of explosive materials in the THz range", Acta Phys. Pol. A. 2010;118:1229–1231.

[5] Burnett A., Fan W., Upadhyay P., Cunningham J., Edwards H., Munshi T., Hargreaves M., Linfield E., Davies G.; "Complementary spectroscopic studies of materials of security interest", Proc SPIE. 6402, Optics and Photonics for Counterterrorism and Crime Fighting II, 64020B (September 28, 2006).

[6] Choi MK, Bettermann A, Van Der Weide DW, Crompton A, Roskos H, Unterrainer K, et al., "Potential for detection of explosive and biological hazards with electronic terahertz systems", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 2004 362 337-349 (15 February 2004).

[7] Ung, B., Balakrishnan J., Fischer B., Ng B. W.- H. and Abbott D., "Terahertz detection of substances for security related purposes", Proc. SPIE 6414, Smart Structures, Devices, and Systems III, 64141U (January 11, 2007).

[8] Huang F, Schulkin B, Altan H, Federici JF, Gary D, Barat R, et al., "Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy", Appl. Phys. Lett. 85, 5535 (2004).

[9] Wilkinson J., Caulder S.M., Portieri A., "Manufacturing process effects on the terahertz spectra of RDX", Proc. SPIE 6949, Terahertz for Military and Security Applications VI, 694904 (April 15, 2008).

[10] Allis DG, Zeitler JA, Taday PF, Korter TM., "Theoretical analysis of the solid-state terahertz spectrum of the high explosive RDX", Chemical Physics Letters (2008), 463(1-3), 84-89.

[11] Liu H-, Chen Y, Bastiaans GJ, Zhang X., "Detection and identification of explosive RDX by THz diffuse reflection spectroscopy", Optics Express, Vol. 14, Issue 1, pp. 415-423 (2006).

[12] Allis DG, Korter TM., "Theoretical analysis of the terahertz spec-

trum of the high explosive PETN", ChemPhysChem, Vol. 7, Issue 11, pp. 2398–2408, November 13, 2006.

[13] Leahy-Hoppa MR, Fitch MJ, Zheng X, Hayden LM, Osiander R., "Wideband terahertz spectroscopy of explosives", Chemical Physics Letters, Vol. 434, Issue 4, p. 227-230, 2007.

[14] Etayo, D. Maestrojuan I., Teniente J., Ederra I. and Gonzalo R., "Experimental explosive characterization for counterterrorist investigation", Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Vol. 34, Issue 7-8, pp. 468-479 (2013).

[14] Maxwell-Garnett, J.C. 1904, Phil. Trans. R. Soc. B, Series A, 203, 385–420.

[15] Jepsen PU, Fischer BM., "Dynamic range in terahertz time-domain transmission and reflection spectroscopy", Optics Letters, Vol. 30, Issue 1, pp. 29-31 (2005).

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través de los proyectos TEC2009-11995, CSD2008-00066 e INNPACTO IPT-2011-0960-390000. Los autores quieren agradecer especialmente a la Guardia Civil toda la asistencia técnica durante la realización de este trabajo.