

Tecnologías Emergentes

Firma radar de vehículos aéreos no tripulados: revisión de datos publicados y tendencias actuales

Autores: TCol D. Guillermo Jenaro de Mencos, Jefatura de Ingeniería, MALE; D. Diego Bueno Pérez, ISDEFE, Jefatura de Ingeniería, MALE; D. David Poyatos Martínez, D. David Escot Bocanegra, Área de Radiofrecuencia, INTA.

Palabras clave: RPAS, RCS, firma radar, sistemas anti-RPAS, detección de RPAS.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 2.2.1; MT 3.2.1; MT 3.5.2.

Introducción

A lo largo de los últimos años el uso de los RPAS ha dejado de ser exclusivamente militar, extendiéndose su uso al ámbito civil. En este mercado el elevado volumen de ventas de estos equipos no ha hecho más que aumentar, lo que está generando una reducción en los costes de adquisición de sistemas y componentes, favoreciendo un avance tecnológico muy acusado. Esta mejora y abaratamiento de la tecnología ha permitido un acceso al público mayoritario, provocando en algunos casos incidentes de cierta gravedad al invadir espacios protegidos y ser aprovechados por grupos terroristas que emplean estos sistemas en actividades de vigilancia o para la realización de atentados.

Se trata de amenazas que se ven directamente beneficiadas por el propio avance de la tecnología y la innovación y que, previsiblemente, en los próximos años, también evolucionen en cuanto a sofisticación y complejidad. Aspectos tales como la reducción de tamaño, aumento de autonomía energética, mejora de los *data-links*, uso de nuevas frecuencias, menor dependencia de los sistemas tanto de navegación como de mando y control, empleo de cargas de pago más peligrosas, ataque coordinado de varios RPAS, entre otros, complicarán

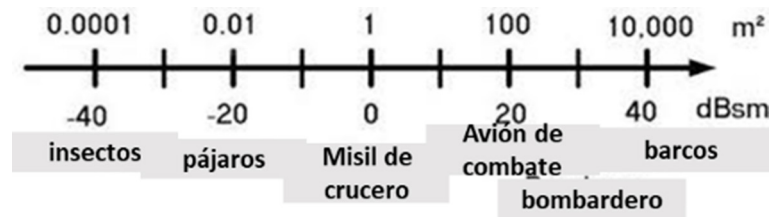


Fig. 1. Rango de RCS para diversos elementos, en m² y en dBsm. (Fuente: propia)

notablemente las posibilidades de detección, identificación y neutralización de estos sistemas.

El uso inadecuado constituye una amenaza creciente tanto para infraestructuras como para concentraciones de personas. De esta manera se hace imprescindible tanto la detección temprana de estos sistemas, para el caso de amenazas, como la reducción de la detectabilidad de las aeronaves propias para que cumplan su misión de forma eficiente. De entre las diferentes soluciones que actualmente existen que permitan la detección de estos sistemas, los más fiables son las soluciones basadas en radar, si bien para conocer su efectividad resulta fundamental conocer cómo se comportan estos sistemas frente a la incidencia de las ondas sobre

su superficie. A lo largo del artículo se analizarán las publicaciones más relevantes en este sentido y que aportan una base sobre el estado del arte en la detección radar de RPAS.

Desarrollo

La sección transversal radar (RCS) es un parámetro clave para determinar si un RPAS va a poder ser detectado por un radar y a qué distancia. Existen diversos métodos de medida de la RCS de este tipo de aeronaves, ya sean medidas estáticas en cámara anecoica o medidas dinámicas con el RPAS en vuelo. La RCS depende de varios parámetros, como son la frecuencia y el ancho de banda de la señal radar, la polarización del campo con el que se transmite y recibe la señal, la geometría del blanco, los materiales constitutivos

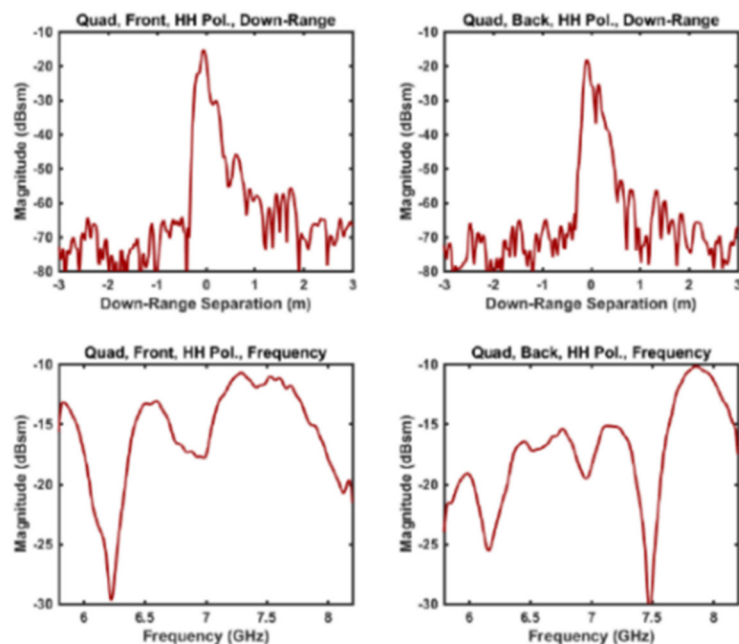


Fig. 2. Medidas de RCS [5] (dBsm) en un dron comercial DJI F450 HH RCS. Dimensiones Altura: 19 cm, máxima longitud 49.5 cm, distancia entre patas: 21 x 21cm. (Fuente: propia)

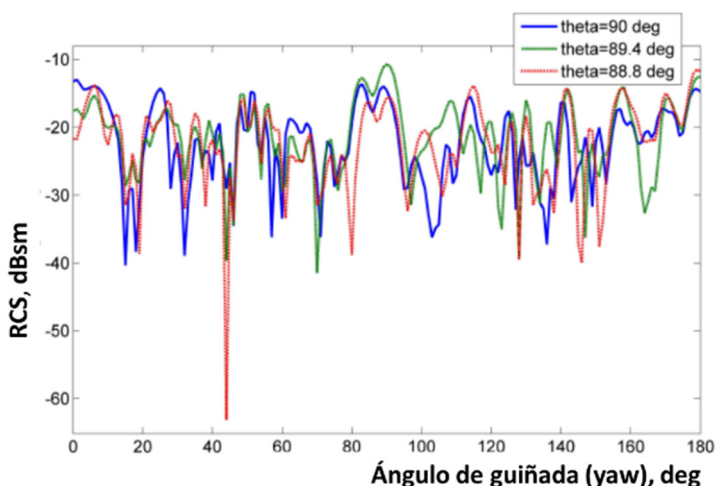


Fig. 3: Medidas de RCS [6] en cámara anecoica del Parrot AR RPAS, polarización vertical, a una frecuencia de 8 GHz. (Fuente: propia)

o el ángulo de incidencia de la iluminación radar [1]. El procedimiento más extendido para medirla y analizarla es en cámara anecoica y utilizando imágenes radar de apertura sintética inversa (ISAR) [2], aunque también se puede obtener a partir de simulaciones mediante *software*.

Según los trabajos de Knott [3], la sección radar equivalente para diversos objetos abarca un rango que va desde -40 dBsm para los insectos hasta 40 dBsm para grandes barcos, como muestra la figura 1. En el caso de las aves, el rango abarca aproximadamente desde -30 dBm hasta -10 dBm. En esa misma zona de valores se encuentran los RPAS de pequeño y mediano tamaño, básicamente multicopteros y plataformas de ala fija, con un tamaño aproximado 30 cm a 1 m de dimensión característica.

Los radares de ondas milimétricas tienen buenas características de penetración en condiciones de niebla, polvo y humo, y están bien dotados para la detección y seguimiento de RPAS [4], pero puede ser difícil discriminar sus ecos radar de los debidos a aves o a enjambres de insectos grandes, cuya RCS puede ser significativa, aportando por tanto una cantidad de ecos muy elevada y siendo importante para ello desarrollar algoritmos que faciliten la detección de las posibles amenazas.

A lo largo del artículo se hace una revisión de los trabajos publicados recientemente en este campo y se muestra las características de reflectividad de varios RPAS comerciales con objeto de conocer sus rasgos más característicos frente a la incidencia del radar para ser capaces de detectarlos

(diferenciándolos de otros blancos similares como aves en vuelo).

Medidas de sección transversal radar de micro y mini RPAS

Herschfelt et Al [5] han realizado medidas en cámara anecoica sobre dos multicopteros comerciales. La figura 2 muestra la RCS de un multicoptero (DJI F-450) visto por delante y por detrás. En la figura superior, para una frecuencia determinada, se presenta la RCS en función del ángulo y, en la inferior, la RCS en función de la frecuencia. Todas para polarización horizontal. En la parte superior se observa un pico en el centro con un rizado hacia los laterales. El pico se corresponde con el centro geométrico y se observa una zona de transición del metal (zona central) al plástico de los brazos. Otro aspecto interesante es la variación de la RCS con la frecuencia pues, por un lado, muestran una caída importante a 6.25 GHz visto por delante y a 7.5 GHz por detrás. Se observa además una leve pendiente de modo que a más frecuencia se tiene mayor RCS. El valor medio en la figura es de -17 dBsm.

Los mismos autores han hecho pruebas con otra plataforma de mayores dimensiones (DJI S-1000+Octocopter) con distancia entre patas de 46 x 55 cm, altura de 64 cm, longitud de 130 cm y medido con polarización vertical. Los resultados [5] fueron similares en cuanto a forma y tendencia, pero con valores algo superiores y, en particular, un valor medio de -8 dBsm.

	RCS medida en m ² o en (dBsm)			
	Dimensiones	Frecuencia	Pol. vertical	Pol. horizontal
DJI F450 [5]	Altura: 19 cm, ancho 49.5cm	Rango 5.8-8.2 GHz	---	-17 dBsm
DJI S-1000 Octocopter [5]	Altura 64cm, ancho 130cm	Rango 5.8-8.2 GHz	-8 dBsm	----
PARROT™ AR RPAS [6]	Altura 45.1cm, ancho 51.7cm	8 GHz	-25dBsm	----
SYMA X5SC-1 [8]	Altura 4.5cm, ancho 32 cm, plástico	Rango 8.0-12.0 GHz	0.0312 m ² (-15dBsm)	0.0229 m ² (-16dBsm)
AIRVISION NT4 CONTRAS [8]	Altura 22 cm, ancho 57 cm	Rango 8.0-12.0 GHz	0.271 m ² (-5.6dBsm)	0.276 m ² (-5.6dBsm)
DJI Phantom2 [7]	Ancho 35cm	Rango 12-15 GHz	-13.5 dBsm	-15.3 dBsm

Tabla 1: resultados de medidas de RCS en varios multirotors [5,6,7,8]. (Fuente: propia)

Modelo	Dimensión	RCS medida en dBsm (entre paréntesis)					
		Criterio					
DJI Phantom 2	35 cm diagonal	Ángulo alabeo	8° (-13.8)	45° (-19.4)	90° (-9.3)	135° (-18.8)	172° (-16.3)
Ídem		Movimiento Hélices	Estacionario (-14.6dB)			En rotación (-15.3dB)	
Ídem		Frecuencia	12-15GHz (-17.2dB)			3-6 GHz (-27.5dB)	
Ídem		Polarización	VV (-13.5dB)			HH (-15.3dB)	
Ídem		Elevación	0° (-9.3dB)			-90° (-9.0dB)	
3DR Solo	46 cm diagonal	Frecuencia	12-15GHz (-14.1dB)			3-6 GHz (-24.2dB)	
DJI Inspire I	56 cm diagonal	Frecuencia	12-15GHz (-3.0dB)			3-6 GHz (-13.7dB)	

Tabla 2: Resultados de medidas de RCS en varios multirotores [5,6,7]. Si no se indica otra cosa, las medidas son en banda 12-15 GHz y polarización vertical (VV). (Fuente: propia)

La figura 3 muestra datos obtenidos por Guay, R. [6] para medidas sobre el Parrot AR RPAS (multicóptero con carena y dimensiones 45.1 x 51.7 cm) a una frecuencia de 8 GHz y polarización vertical, pero ahora en función del ángulo de aspecto con el que se ilumina la plataforma. Se observan valores medios del orden de -25 dBsm.

Imágenes radar de apertura sintética inversa

Li [7] y Pieraccini [8] han realizado también medidas sobre multirotores comerciales obteniendo imágenes radar de apertura sintética inversa (ISAR). Las imágenes permiten detectar los puntos calientes y relacionar la RCS con la geometría. Así, se observa que los motores, baterías y materiales metálicos o de fibra de carbono son los que más aportan a la firma radar y que las hélices no aportan prácticamente nada (estén girando o no). La figura 4 muestra

resultados para distintas bandas de frecuencia, con diferencias significativas de RCS. La tabla 2 permite comparar resultados cuando se modifica el ángulo de alabeo (*roll*),

hélices de DJI Phantom Vision 2+ de tres tipos, de plástico, fibra de carbono y plástico con camisa exterior de metal, encontrando que las propiedades eléctricas de la fibra de

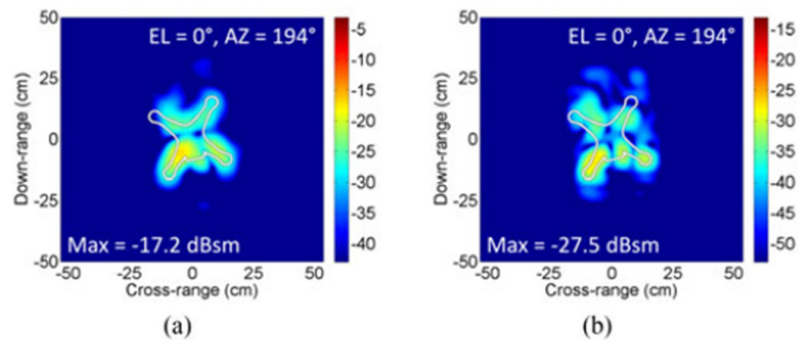


Fig. 4: Medida comparativa de RCS e imágenes ISAR [7] a dos frecuencias distintas: (a) 12 – 15 GHz. (b) 3 - 6 GHz. (Fuente: propia).

con o sin movimiento de las hélices, polarización, ángulo de elevación y frecuencia. El criterio más significativo es la frecuencia. Ritchie [9] ha realizado medidas en campo sobre

carbono son cercanas a las de un conductor eléctrico perfecto mientras que las del plástico son cercanas a las del aire a las frecuencias de medida.

Tipo de pájaro	Peso (gr)	RCS teórica, m ² (dBsm)			RCS experimental	
		Banda X	Banda S	Banda L	Banda X	Banda S
Warbler (curruca)	10	0.0005(-33)	0.0005 (-33)	0.00002 (-47)		
Sparrow (gorrión)	25	0.0006(-32)	0.0016 (-28)	0.00013(-39)	-37	-28
Starling (estomino)	75	0.0013(-29)	0.0017 (-28)	0.0010(-30)	-31	
Plover (chorlito)	200	0.0014(-29)	0.0014 (-29)	0.0051(-23)		
Pigeon (paloma)	500	0.0027(-26)	0.0038 (-24)	0.0109(-20)	-28	-21
Duck (pato)	800	0.0044(-24)	0.0031 (-25)	0.0088(-21)	-21	-30
Swan (cisne)	10000	0.024(-16)	0.027 (-16)	0.021(-17)		

Tabla 3: Resultados de medidas de RCS en pájaros [8]. (Fuente: propia)

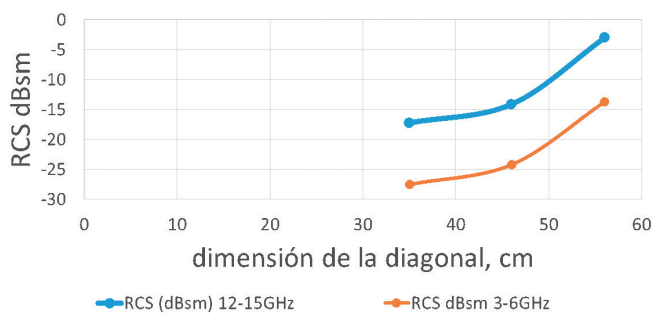


Fig. 5: Sección transversal radar y dimensiones. (Fuente: propia)

Un resumen de resultados se encuentra en la tabla 1 y la tabla 2.

Una primera conclusión de la Tabla 1 es que la RCS media en polarización vertical no muestra diferencias significativas con la horizontal [7, 8]. Se tienen valores entre -5 y -25 dBsm. Asimismo, se muestra que las componentes *micro-Doppler* con polarización horizontal permiten identificar las hélices (ensayos a 2.4 GHz, ancho de banda de 45 MHz, potencia 0.2 W, distancias al blanco de entre 70 y 150 m). Otro aspecto a considerar es la aportación de la carga de pago. Fioranelli [10] ha aplicado la *Short Time Fourier Transform* (STFT) para discriminar cuándo los RPAS tienen más carga, pero lo importante es que la carga de pago puede añadir RCS al conjunto.

El efecto de la dimensión del RPA

En principio se puede pensar que un RPA de mayor tamaño tendrá mayor RCS, es decir, la firma radar se incrementará con la dimensión característica. La figura 5 presenta los resultados para varios RPAS comerciales encontrándose nuevamente que el parámetro importante es la frecuencia y que, efectivamente, a mayor dimensión mayor RCS.

Long To [11] realizó medidas in situ con un equipo portátil y en cámara anecoica, proporcionando resultados sobre el RPA *Aerosonde* (figura 6). Se demuestra la posibilidad de medir RCS en el exterior con un equipo portátil. Además, cabe destacar el hecho de que la RCS más elevada se encuentra en la zona de cabeza, cola y costillas de las alas.

Resultados de simulación

Schröder [12] ha realizado una simulación numérica con el *Método de los Momentos y Elementos Finitos*, obteniendo buenos resultados. La figura 7

muestra la comparativa entre resultados numéricos y experimentales en el DJI Phantom II, con valores de RCS entre -10 y -20 dBsm. Además, se hace un análisis de señal *micro-Doppler* para polarización horizontal y vertical, resultando que es posible identificar al dron en el primer caso y no en el segundo. Para este análisis basta con modelar únicamente la parte rotatoria pero, si ésta es de plástico, es prácticamente indetectable. Harmanny [13] aplica también el análisis del contenido espectral en el tiempo de la señal *micro-Doppler* para discriminar al RPA.

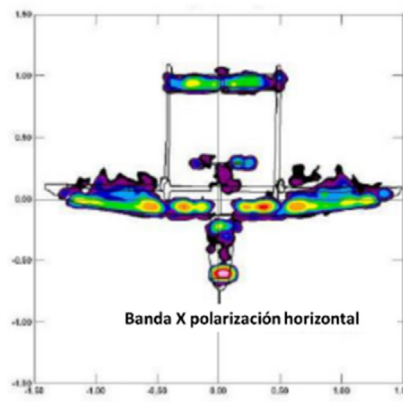


Fig. 6: Imágenes RCS ISAR (campo lejano) para el UAV *Aerosonde* en cámara anecoica con ángulo de azimuth 0°, banda X. (Fuente: propia)

Medidas de sección transversal radar de aves

La reflectividad radar de un ave se debe principalmente a que el 65% de su masa está formada por agua, pudiéndose hacer un cálculo teórico que resulta comparable a los resultados experimentales. La tabla 3 muestra la sección transversal radar de varios tipos de aves, en dBsm y m², en tres bandas de frecuencia diferentes (L, S y X).

Análisis *micro-Doppler* del eco radar

Los trabajos de Torvik, Olsen y Griffiths [14, 15] presentan un método de discriminación entre RPAS y aves basado en el análisis del efecto *Doppler* de la señal recibida de las aves debido al movimiento de las alas, en concreto un análisis *micro-Doppler*, que consiste en filtrar paso alto la señal para eliminar los ecos del *clutter* estacionario, eliminar el efecto *Doppler* debido al movimiento traslacional y, finalmente, filtrar paso bajo para extraer el movimiento relativo de las diferentes partes del cuerpo de las aves, en especial las alas. Así, si se representan los desplazamientos de frecuencia obtenidos mediante una transformada corta de Fourier (STFT) frente al tiempo, se obtienen espectrogramas que representan la firma *micro-Doppler* del ave en cuestión, como la que muestra la figura 8. La elección de los parámetros de la STFT se realiza en función de la clasificación de las aves en base al tamaño y al movimiento, y de la banda frecuencia de trabajo del radar. En el caso de los grandes radares 3D empleados en vigilancia aérea estos parámetros son difíciles de obtener.

Cuando se trata de realizar el análisis *micro-Doppler* en tiempo real, la dificultad es aún mayor y hay que relajar los requisitos de resolución, según se muestra en los trabajos de Alabaster y Hughes [16].

En el caso estudiado en [15], el efecto *micro-Doppler* y los espectrogramas para el caso de un pato (*Mallard Duck*) muestran que el 56% de la potencia del efecto está generada sólo por las alas. Otros trabajos, como los de Blacksmith y Mack [17], sugieren que los resultados pueden variar sensiblemente en función de la banda utilizada.

Torvik, Olsen y Griffiths [18] estudiaron también el comportamiento de aves más grandes, como el alcatraz, llevando a cabo observaciones empleando un radar SAR en banda X y polarización vertical desde el Centro de Experimentación del INTA en El Arenosillo (Huelva). Como resumen de los resultados de este estudio se tiene que, en banda X, se obtiene con más facilidad un equilibrio entre resolución en tiempo y en frecuencia, una de las mayores dificultades que se había observado empleando el análisis *micro-Doppler* en banda K. Se probaron además otros algoritmos de procesado con mayor resolución, como la pseudo-transformada de Wigner-Ville. Otra de las cuestiones que se confirmaron en estos estudios fue la influencia del

ángulo relativo entre el ave y el radar, que hace variable la influencia del aleteo en la sección radar obtenida.

En conclusión, se constata la existencia de un problema a la hora de detectar RPAS de pequeño y medio tamaño por la posible presencia de ecos debidos a aves de tamaño similar o más grandes, y se esboza una posible solución mediante el análisis en tiempo real del efecto micro-Doppler del aleteo de las aves, que puede servir para distinguirlos de los RPAS.

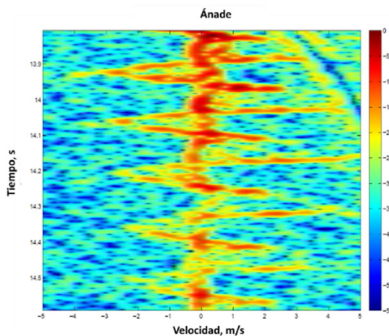


Fig. 8. Espectrograma de un pato común en vuelo, alejándose del radar [15]. (Fuente: propia)

Conclusiones

Se ha realizado una revisión de los datos publicados en lo referente a la adquisición de firma radar de RPAS de pequeño y mediano tamaño, y a la detección e identificación de este tipo de aeronaves. Estos datos podrán ser usados, además, para definir las metodologías para reducción de la sección transversal radar de los nuevos sistemas. Se ha observado que existe dificultad para distinguir entre la respuesta radar de los RPAS y la de las aves. El análisis de los datos examinados muestra que hay cierto solapamiento entre la firma radar de ambos blancos y que ese solapamiento puede ser resuelto mediante técnicas tales como el análisis micro-Doppler.

Referencias

[1] D. C. Jen, *Radar and Laser Cross Section Engineering*. AIAA Education Series. 2nd edition. American Institute of Astronautics and Aeronautics. **2005**.
 [2] D. R. Wehner, *High Resolution Radar*. 2nd edition. Artech House, Inc. **1994**.
 [3] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, *Radar Cross Section*. Sci-Tech Pub. **2004**.

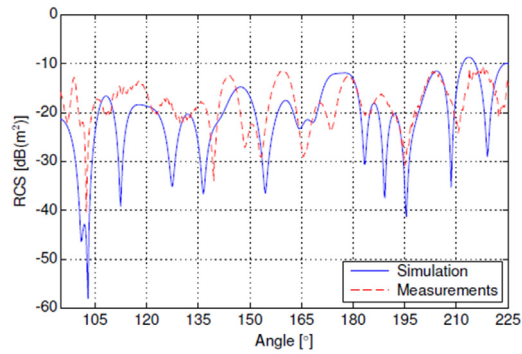


Fig. 7: Comparativa entre resultados experimentales y de simulación numérica [12] a 10 GHz. (Fuente: propia)

[4] *Detection of small RPASs with millimeter wave radar*. Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques. <https://www.fhr.fraunhofer.de/en/businessunits/security/Detection-of-small-drones-with-millimeter-wave-radar.html> **2018**.
 [5] Herschfelt, A., Birtcher, C.R., Gutierrez, R.M., Rong, Y., Yu, H., Balanis, C.A., Bliss, D.W. *Consumer-grade RPAS radar cross-section and micro-Doppler phenomenology*, IEEE Radar Conference, RadarConf 2017. pp. 0981–0985. **2017**.
 [6] Guay R. *The Dynamic Measurement of an Unmanned Aerial Vehicle Radar Cross Section*, Royal military College of Canada. **2016**.
 [7] Li, C. J. & Ling, H. *An Investigation on the Radar Signatures of Small Consumer RPASs*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol.16, 649–652. **2017**.
 [8] Pieraccini, M., Miccinesi, L. & Rohjani, N. *RCS measurements and ISAR images of small UAVs*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 32, 28–32. **2017**.
 [9] Ritchie, M., Fioranelli, F., Griffiths, H. & Torvik, B. *Micro-drone RCS analysis*. 2015 IEEE Radar Conference - Proceedings 452–456. Johannesburg. South Africa. **2015**.
 [10] Ritchie, M., Fioranelli, F., Borrión, H. & Griffiths, H. *Classification of loaded/unloaded micro-drones using multistatic radar*. Electronics Letters. Vol 51, 1813–1815. **2015**.
 [11] To, L., Bati, A. & Hilliard, D. *Radar cross section measurements of small unmanned air vehicle systems in non-cooperative field environments*. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2009, Proceedings 3637–3641. Berlin. **2009**.
 [12] Schröder A, Aulenbacher U, Renker M, Boniger U, Oeschlin, R. *Numerical RCS and Micro-Doppler Investigations of a Consumer UAV*. Proc. SPIE 9997, Target and Background Signatures II, 99970 24/10/2016.
 [13] R. I. A. Harmanny, J. J. M. De Wit, and G. Prémel Cabic, “Radar micro-Doppler feature extraction using the spectrogram and the cepstrogram,” in European Microwave Week 2014: “Connecting the Future”, EuMW 2014 - Conference Proceedings; EuRAD 2014: 11th European Radar Conference. **2014**.
 [14] Torvik, K. E. Olsen, and H. Griffiths, *Classification of Birds and UAVs Based on Radar Polarimetry*, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. **2016**.
 [15] Torvik, K. E. Olsen and H. Griffiths, *K-band radar signature analysis of a flying mallard duck*, 2013 14th International Radar Symposium (IRS), vol. 2 pp. 584–591. Dresden. **2013**.
 [16] M. Alabaster, E. J. Hughes, and D. W. Forman. *Is it a bird or is it a plane?* in 2012 International Waveform Diversity and Design Conference, WDD 2012. **2012**.
 [17] Blacksmith and R. B. Mack, *On Measuring the Radar Cross Sections of Ducks and Chickens*, Proc. IEEE, vol 53, no. 8, p. 1125. **1965**.
 [18] Torvik, K. E. Olsen, and H. D. Griffiths, *X-band measurements of radar signatures of large sea birds*, in 2014 International Radar Conference, Radar 2014. **2014**.