

## ANTENAS REFLECTORAS PLANAS EN TECNOLOGÍA IMPRESA PARA RADARES METEOROLÓGICOS

*Eduardo Martínez de Rioja y del Nido, José Daniel Martínez de Rioja y del Nido,  
José Antonio Encinar Garcinuño*

Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones  
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

**Resumen** – Las antenas de tipo reflectarray presentan unas características muy atractivas para su montaje a bordo tanto de aeronaves como de satélites. Aparte de tener un proceso de fabricación sencillo y de coste reducido, son ligeras de peso y fáciles de desplegar. Además, comparten muchas de las ventajas de los reflectores parabólicos y las agrupaciones de antenas, siendo su principal limitación el ancho de banda. En este trabajo, se estudia su posible utilización en los sistemas de radar meteorológico que operan en doble polarización, también denominados radares polarimétricos, desarrollados en los últimos años para mejorar las prestaciones de los radares Doppler tradicionales.

### 1. Los radares meteorológicos

Los radares meteorológicos son un tipo especial de dispositivos empleados para localizar precipitaciones, calcular sus trayectorias y estimar su composición (agua, nieve, granizo). Su aparición se remonta al final de la Segunda Guerra Mundial, cuando los operadores de los radares de vigilancia aérea empezaron a detectar ruido asociado a los fenómenos meteorológicos en forma de ecos no deseados. Distintos grupos de científicos en Estados Unidos y Canadá comenzaron a estudiar estos ecos aislándolos del resto, y unos pocos años después se desarrollaron los primeros radares destinados al estudio del clima [1].

#### 1.1 Fundamentos

El principio de funcionamiento de un radar meteorológico es muy similar al de un radar de vigilancia primario encargado de la detección de blancos u objetivos potenciales. Las señales transmitidas son pulsos de corta duración, que se repiten periódicamente. Entre pulso y pulso, el radar recibe los ecos de las señales transmitidas para poder estimar la intensidad y consistencia de los objetos reflectores que se encuentran en su campo de visión (ver Fig. 1).

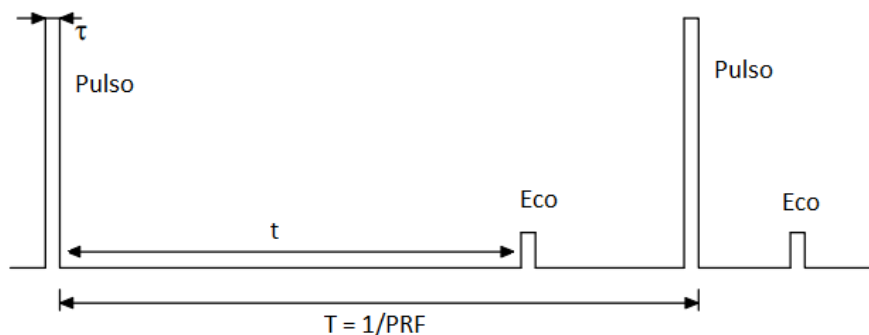


Fig. 1. Principio de funcionamiento de un radar pulsado.



La frecuencia portadora utilizada por este tipo de radares se escoge para poder “interactuar” con las partículas de precipitación: cada partícula intercepta la onda radiada y refleja una parte de su potencia en la dirección del radar, mientras que el resto se dispersa en otras direcciones del espacio. La cantidad exacta de potencia reflejada que se recibe en el radar es una función compleja que depende de la forma, el tamaño y la constante dieléctrica de las partículas. Al parámetro que mide la relación entre la potencia incidente y la reflejada se le denomina sección radar del blanco.

La distancia hasta el blanco puede obtenerse midiendo el tiempo ‘ $t$ ’ transcurrido entre la transmisión un pulso y la recepción de su eco, suponiendo que las ondas se propagan a la velocidad de la luz ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s), mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

La máxima distancia a la que pueden encontrarse los blancos para hacer una medida correcta de su posición, denominada rango máximo no ambiguo ( $R_{mna}$ ), es inversamente proporcional al valor de la frecuencia de repetición de pulsos implementada en el sistema ( $PRF$ ):

$$R_{mna} = \frac{c}{2 \cdot PRF}$$

Los ecos asociados a estos blancos se recibirán en el radar justo antes de iniciar la transmisión del siguiente pulso. Aquellos blancos que estén situados a una distancia mayor de  $R_{mna}$  generarán ecos que serán recibidos en la “ventana” del siguiente pulso transmitido. El radar asociará esos ecos al segundo pulso, dando lugar a una estimación errónea de la distancia a la que se encuentra el blanco. A este tipo de blancos se los denomina blancos de segunda vuelta.

Los radares con funcionalidad Doppler, además, son capaces de medir el desplazamiento en frecuencia que produce el movimiento de las partículas en la onda reflejada, y con ello, obtener la velocidad del viento. Un desplazamiento positivo en frecuencia se corresponde con un blanco acercándose al radar, mientras que si el valor medido es negativo el blanco se aleja. La relación entre la velocidad del blanco ( $V$ ) y la desviación en frecuencia de la señal recibida ( $f_d$ ) viene dada por la siguiente fórmula, donde  $\theta$  es el ángulo que forma la dirección de exploración del radar con la dirección del movimiento de las partículas:

$$f_d = \frac{2 \cdot V \cdot \cos \theta}{\lambda}$$

La  $PRF$  también influye en el valor máximo de velocidad que es posible medir en un blanco, puesto que representa el máximo desplazamiento Doppler que puede tener en frecuencia la señal recibida. Por tanto, vemos que para poder medir un amplio rango de velocidades nos interesa que la  $PRF$  sea alta. Esto choca con el requisito anterior para la  $R_{mna}$ , puesto que a mayor  $PRF$ , menor será el área de trabajo del radar. Para resolver este compromiso, los sistemas reales suelen presentar distintos valores de  $PRF$ , de forma que se pueda pasar de una a otra según interese medir velocidades o distancias.

Normalmente, las antenas utilizadas en este tipo de sistemas están basadas en reflectores parabólicos, alimentados en muchos casos por *phased-arrays*. La antena del radar suele estar situada en la parte superior de una torre o estructura elevada, cubierta por un radomo esférico que le sirve de protección. Los valores típicos de ganancia oscilan entre los 20 dB y los 45 dB. Para la medida de los ecos, la antena gira sobre su eje vertical realizando un barrido de 360° en

azimut. En cada vuelta, se varía el ángulo de elevación sobre el plano horizontal, típicamente entre  $0.5^\circ$  y  $25^\circ$ , para obtener también una medida de la distribución de los ecos en función de la altura atmosférica. En la Fig. 2 se puede observar una fotografía del radar situado en el Cerro de Batallones, en el municipio madrileño de Torrejón de Velasco.



**Fig. 2.** Radar meteorológico del Cerro de Batallones (Torrejón de Velasco, Madrid).

El coste y la complejidad de diseño son los principales inconvenientes a la hora de sustituir las antenas de reflector por otras basadas completamente en *arrays* (agrupaciones de antenas), a pesar de que con ellas se podría lograr una mayor funcionalidad. En este trabajo se propone como alternativa el uso de antenas reflectoras planas en tecnología microstrip, también conocidas como *reflectarrays*, que proporcionarían muchas de las ventajas de los *arrays*, solo que con un coste más reducido y una fabricación más sencilla.

## 1.2 Medidas

La interpretación de las señales recibidas por el radar resulta a menudo compleja, debido a la gran variedad de tipos de precipitación, formas y tamaños de las partículas. Por ejemplo, la relación entre el tamaño de una partícula y la cantidad de potencia reflejada es altamente no lineal. Si consideramos una gota de agua de forma esférica, aumentar su diámetro al doble produce un aumento de la potencia reflejada en un factor  $2^6$ . También puede ocurrir que las nubes se compongan de varios tipos de precipitación, como agua y nieve o hielo y nieve.

La magnitud medida por un radar meteorológico recibe el nombre de reflectividad ( $Z$ ) y se suele expresar en unidades logarítmicas (dBZ), a partir del valor en unidades lineales en  $\text{mm}^6/\text{m}^3$ . Se define como la suma de los diámetros a la sexta potencia ( $D^6$ ) de las gotas o partículas contenidas en una unidad de volumen, definiendo  $N(D)$  como la función de distribución de las gotas:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) \cdot D^6 dD$$

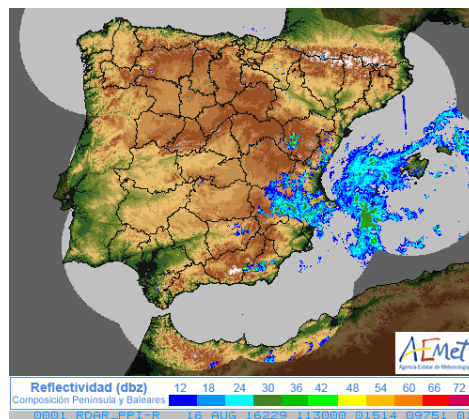
La reflectividad de un blanco puede obtenerse a partir de la potencia recibida ( $P_r$ ) mediante la denominada ecuación radar, que relaciona dichas variables con la potencia transmitida ( $P_t$ ), la duración de los pulsos ( $\tau$ ), la frecuencia portadora del sistema ( $f_p$ ), la ganancia de la antena del radar ( $G$ ) y la distancia al blanco ( $d$ ):

$$P_r = cte \cdot \frac{P_t \cdot \tau \cdot f_p^2 \cdot G^2}{d^2} \cdot Z$$

Por otro lado, la intensidad de lluvia se puede expresar de manera matemática como el flujo de agua a través de una superficie, empleando para ello la función de distribución  $N(D)$  y la velocidad de caída de las gotas  $V(D)$ :

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} V(D) \cdot N(D) \cdot D^3 dD$$

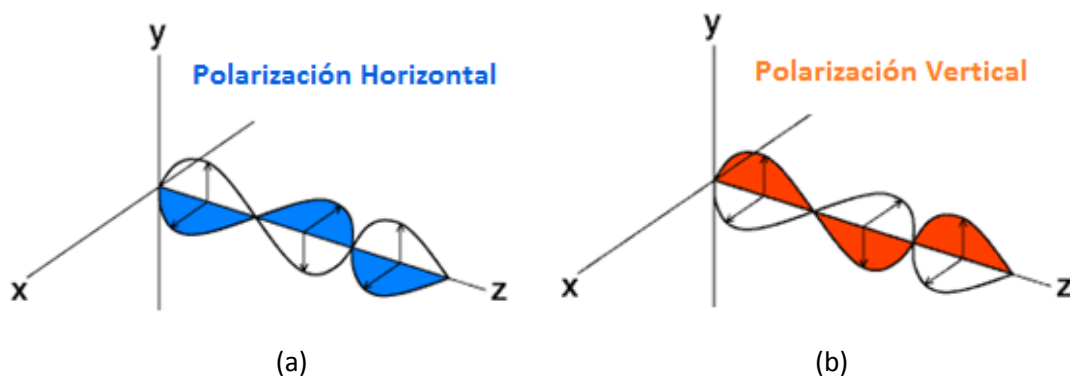
La fórmula de Marshall-Palmer relaciona el valor de la reflectividad con la intensidad de una precipitación a través de la sencilla ecuación:  $Z = a \cdot R^b$ , donde 'a' y 'b' son constantes que dependen del tipo de precipitación. Como cada precipitación cuenta con su propia distribución de tamaños e intensidad, resulta casi imposible conocer estos parámetros a priori, siendo frecuente su ajuste a partir de las medidas realizadas. Por ello, los radares meteorológicos suelen representar directamente los valores de reflectividad (ver Fig. 3).



**Fig. 3.** Imagen de una medida de reflectividad para la Península Ibérica [2].

### 1.3 Radares polarimétricos o de doble polarización

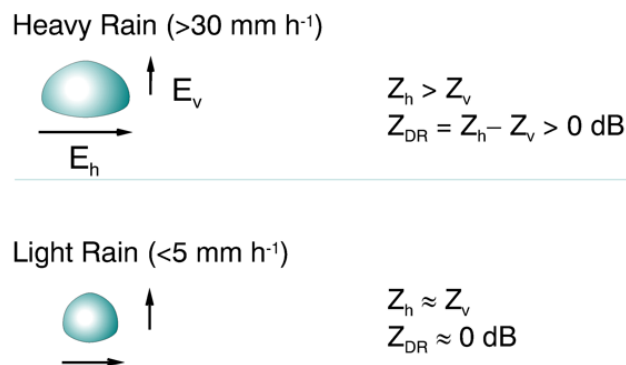
La polarización de una onda hace referencia a la dirección de variación del vector de campo eléctrico con el tiempo. En una onda plana con polarización lineal, el vector de campo eléctrico está contenido en un único plano en el que presenta una variación sinusoidal, siendo perpendicular a la dirección de propagación de la onda y al vector de campo magnético (que a su vez también presenta una variación sinusoidal en un plano ortogonal). Podemos observar una sencilla representación de este concepto en la Fig. 4.



**Fig. 4.** Representación de ondas planas con polarización lineal: (a) horizontal y (b) vertical.

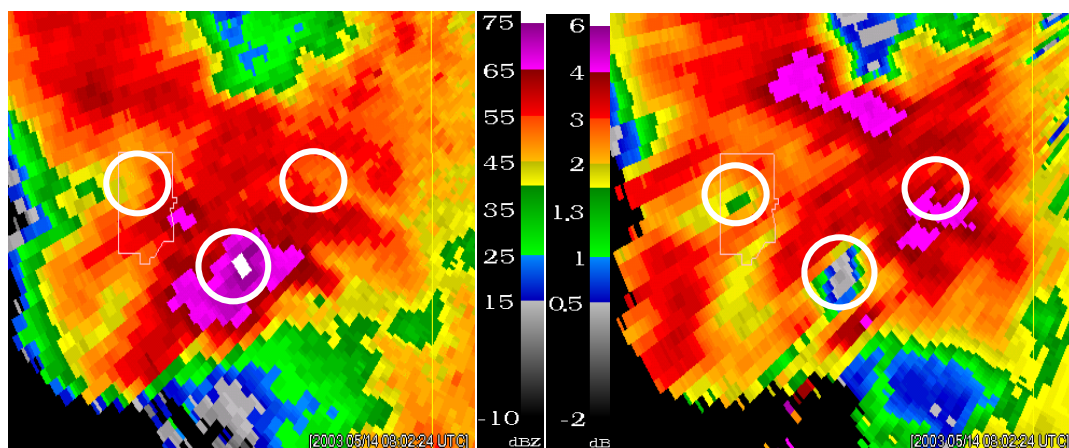
Los radares meteorológicos tradicionales utilizan ondas con polarización lineal horizontal para poder medir la reflectividad de las precipitaciones. Esta técnica, aunque sencilla, carece de precisión suficiente y no permite clasificar correctamente los tipos de hidrometeoros. Para poder llevar esto a cabo, se requiere de un sistema que opere en doble polarización lineal, al transmitir y recibir simultáneamente ondas con polarización horizontal y vertical. A este tipo de radares meteorológicos se los denomina polarimétricos o de doble polarización.

Los radares polarimétricos permiten una mejor estimación de las precipitaciones. Los resultados de sus medidas son los valores de reflectividad horizontal y vertical,  $Z_h$  y  $Z_v$ , de los que se deriva la reflectividad diferencial,  $Z_{dr}$ , obtenida como el cociente de ambas reflectividades (o su diferencia, si se trabaja en unidades logarítmicas). La reflectividad diferencial es un buen indicador de la forma de las partículas, y a partir de la forma es posible estimar su tamaño. Por ejemplo, en el caso de una lluvia pesada, las gotas de agua son de gran tamaño, por lo que al caer tienden a aplanarse, tomando forma oblonga. Esto se traduce en un mayor valor de  $Z_h$  con respecto a  $Z_v$ . Por el contrario, las gotas de agua de una lluvia ligera presentan un tamaño mucho más pequeño, conservando una forma más esférica, lo que arroja medidas similares de  $Z_h$  y  $Z_v$ .



**Fig. 5.** Comparativa entre lluvia pesada y ligera para las medidas de reflectividad.

Otro ejemplo de utilidad de los radares polarimétricos relacionado con  $Z_{dr}$  es la detección del granizo. La constante dieléctrica del hielo es un 20% de la del agua, por lo que la forma de las partículas tiene un efecto menor en el granizo que en la lluvia. Además, las partículas de hielo giran sobre sí mismas al caer, de forma que el valor de  $Z_{dr}$  obtenido suele ser muy pequeño. Por todo ello, el granizo puede detectarse cuando se produce un alto valor de  $Z_h$  acompañado de  $Z_{dr}$  muy pequeño (en ocasiones pueden llegar a medirse valores negativos en dB, ver Fig. 6).



**Fig. 6.** Comparativa entre las medidas de  $Z_h$  y  $Z_{dr}$  para un mismo territorio.



Además de las ya citadas reflectividades, el empleo de la doble polarización permite definir una serie de parámetros adicionales que sirven de ayuda a la hora de clasificar el tipo de precipitación. Uno de ellos es el coeficiente de correlación estadística entre las potencias reflejadas en polarización horizontal y vertical,  $\rho_{HV}$ , que representa una medida de cómo de parecido se comportan las ondas transmitidas en cada polarización entre un pulso y el siguiente. Este estadístico constituye un buen indicador de las regiones en las que hay una mezcla de tipos de precipitación: un valor próximo a 1 hace referencia a una precipitación homogénea, mientras que valores más bajos indican lo contrario.

La fase diferencial específica,  $\theta_{dp}$ , es otro parámetro utilizado para estimar las tasas de lluvia. Mide la diferencia entre la fase de la onda recibida en polarización horizontal y la de la onda en polarización vertical, debida a los efectos de propagación. Dado que las ondas radio viajan a menor velocidad por el agua que por el aire (a causa de su mayor constante dieléctrica), este parámetro puede usarse para estimar la cantidad de líquido que hay en un volumen determinado. Por ejemplo, resulta muy útil para detectar zonas con lluvia pesada.

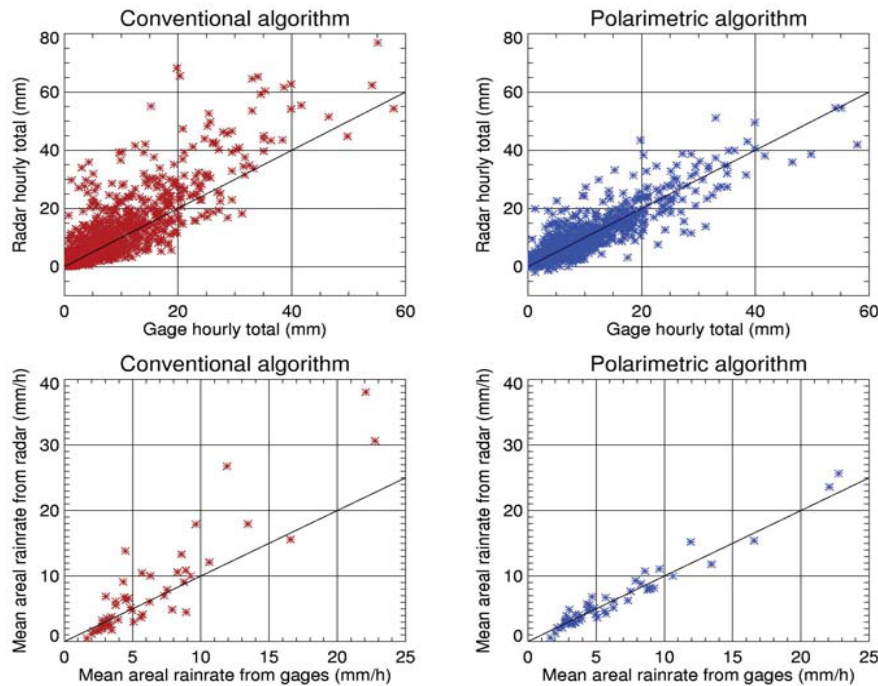
Gracias a todos los parámetros anteriores, los radares polarimétricos permiten una serie de mejoras respecto a los radares meteorológicos convencionales. Los denominados algoritmos de clasificación de hidrometeoros (HCA, *Hydrometeor Classification Algorithms*) hacen uso de ellos para poder realizar una estimación más precisa del tipo de precipitación, la intensidad de la misma y su trayectoria, como se demostró en los estudios realizados en Estados Unidos a principios de siglo, que veremos a continuación.

#### **1.4 El Experimento de Polarización Conjunta**

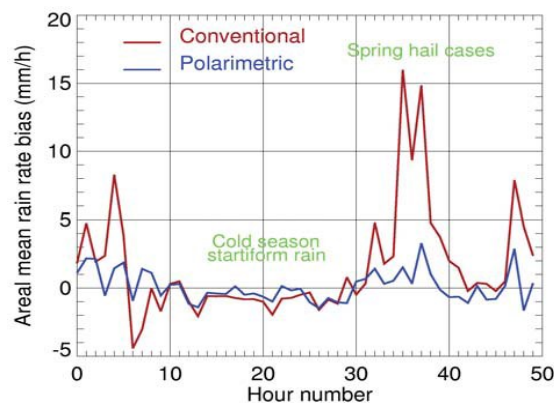
El radar empleado por el Servicio Nacional de Meteorología americano recibe el nombre de WSR-88D (*Weather Surveillance Radar 1988* -el año del primer prototipo- Doppler) o NEXRAD (*NEXt generation RADar*). El sistema de medida cuenta con una antena reflectora de 8.5 m de diámetro que proporciona 45.5 dB de ganancia a 3 GHz. La máxima frecuencia de repetición de pulsos implementada en el sistema es 1.3 kHz y el ancho de los pulsos varía entre 1.5 y 4.5  $\mu$ s. Puede realizar un escaneo volumétrico en 6 minutos, considerando 15 ángulos distintos en elevación [3].

Entre los años 2002 y 2003, los científicos del *National Severe Storms Laboratory* de Oklahoma llevaron a cabo el denominado “Experimento de Polarización Conjunta” (*Joint Polarization Experiment*), en el que se implementó el funcionamiento en doble polarización en uno de los radares WSR-88D del servicio de meteorología para estudiar la mejora operativa debida a la polarimetría y asegurar además su compatibilidad con los equipos existentes.

Una de las primeras investigaciones realizadas fue la comparativa entre la fórmula tradicional de Marshall-Palmer para estimar la intensidad de lluvia a partir de la reflectividad, que denotaremos  $R(Z)$ , y un nuevo algoritmo que incorporaba algunos de los nuevos parámetros proporcionados por el radar polarimétrico,  $R(Z, Z_{dr}, \theta_{dp})$ . El resultado fue que esta segunda técnica mejoraba claramente a la primera en cuanto a media, desviación típica y error cuadrático medio de las estimaciones, como puede observarse en las gráficas de la Fig. 7, donde el algoritmo polarimétrico se aproxima bastante más a las medidas tomadas sobre el terreno. En la Fig. 8 se representa la sobreestimación o subestimación que hace cada algoritmo de las tasas de lluvia para distintas estaciones y tipos de lluvia, que como se puede comprobar es considerablemente menor en el caso del radar polarimétrico.



**Fig. 7.** Comparativa entre la tasa de lluvia medida y la estimada, para un radar meteorológico convencional (rojo) y uno polarimétrico (azul) [4].

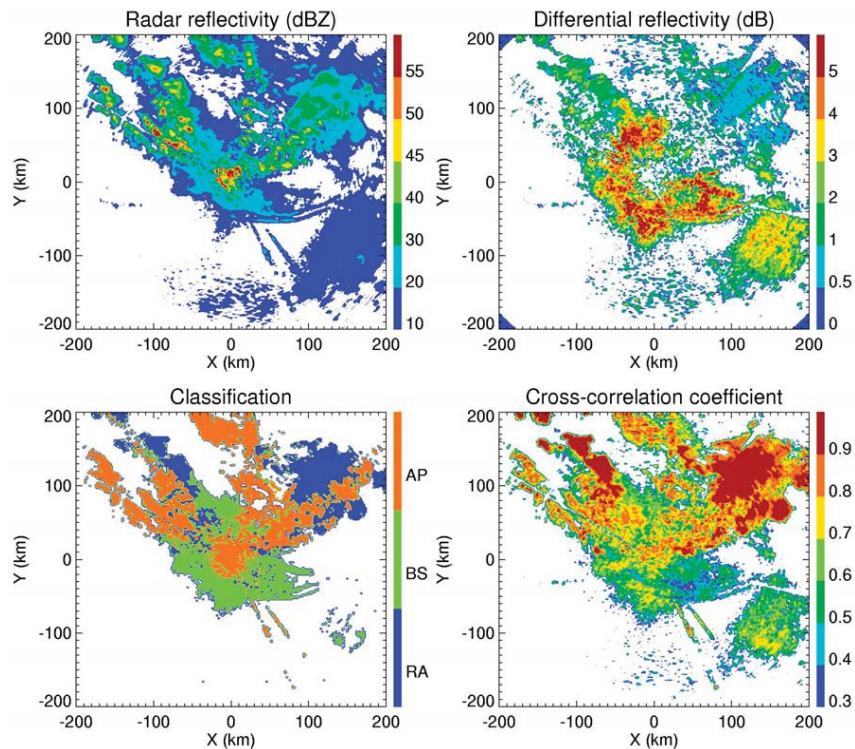


**Fig. 8.** Error en la estimación de los algoritmos convencional y polarimétrico [4].

A continuación, se estudiaron tres algoritmos distintos de clasificación de hidrometeoros: uno más sencillo que sólo distinguía entre ecos meteorológicos y ecos debidos a reflexiones en la superficie terrestre o a agentes biológicos, y otros dos más complejos pensados para ser utilizados en las épocas de verano e invierno. Estos algoritmos, en su versión más avanzada, pueden diferenciar hasta diez tipos de ecos: reflexiones del suelo, agentes biológicos, nieve seca, nieve húmeda, cristales, granizo, lluvia ligera, lluvia moderada, lluvia pesada y mezcla de lluvia y granizo. Los algoritmos hacen uso de los parámetros proporcionados por los radares polarimétricos ( $Z_h$ ,  $Z_v$ ,  $Z_{dr}$ ,  $\rho_{HV}$  y  $\theta_{dp}$ ) y de otros que se derivan de estos. Una descripción más detallada de su funcionamiento puede encontrarse en [5].

En la Fig. 9 podemos ver un ejemplo de funcionamiento del primer algoritmo: las zonas con altos valores de  $\rho_{HV}$ , próximos a 1, se corresponden con precipitaciones homogéneas (RA); en aquellos sitios donde coinciden valores bajos de  $\rho_{HV}$  y altos de  $Z_{dr}$  es debido a agentes biológicos, como pájaros, insectos, etc. (BS); y las zonas con precipitación anómala o reflexiones

del suelo (AP) se detectan debido a valores pequeños de  $Z_{dr}$  (que en algunos casos puede ser incluso negativa) y a valores relativamente altos de  $\rho_{HV}$ .



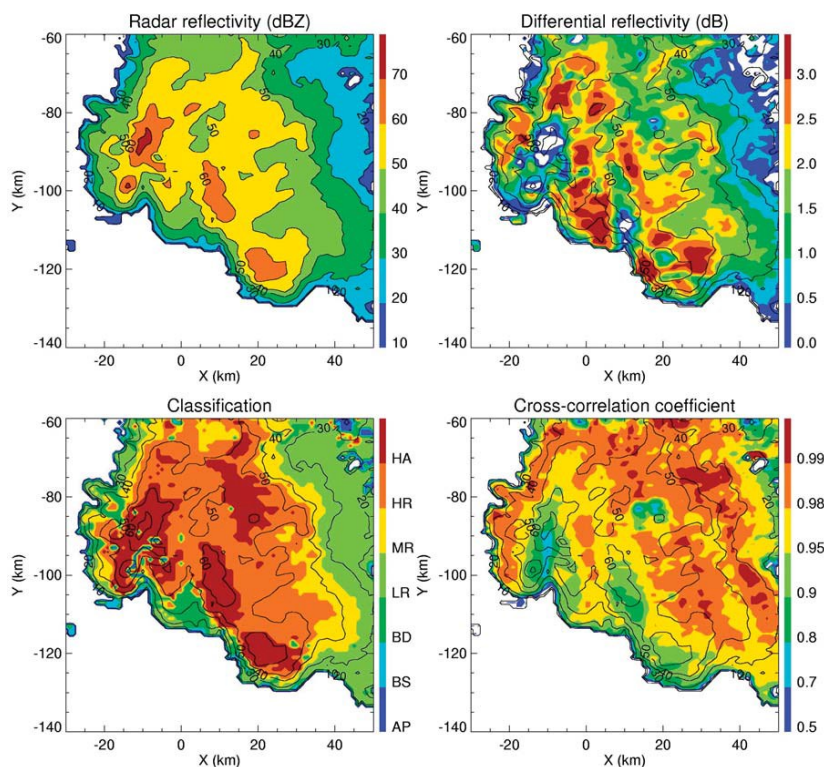
**Fig. 9.** Ejemplo de funcionamiento de un algoritmo de clasificación básico, a partir de las medidas de reflectividad, reflectividad diferencial y el coeficiente de correlación [4].

En lo que respecta a la detección del granizo, el algoritmo polarimétrico consiguió mejores valores de probabilidad de detección y probabilidad de falsa alarma que el algoritmo convencional. Como ya se ha indicado antes, el granizo presenta un alto valor de  $Z_h$  combinado con bajos  $Z_{dr}$  y  $\rho_{HV}$ , aunque las zonas con reflexiones en el suelo o precipitación anómala también pueden llegar a presentar estas características. Por ello, para poder identificar correctamente el granizo se hace uso de otros tres indicadores: la velocidad Doppler ( $V$ ) y dos parámetros derivados de  $Z$  y  $\theta_{dp}$ . Las zonas de precipitación anómala se detectan debido a valores muy altos de estos dos últimos parámetros y muy bajos de  $V$ . En la Fig. 10 se muestra un ejemplo de análisis con el algoritmo de clasificación empleado para la detección del granizo (indicado como HA).

Como conclusión del Experimento de Polarización Conjunta, entre las ventajas ofrecidas por los radares polarimétricos o de doble polarización respecto a los radares tradicionales, se pueden destacar las siguientes:

- Estimación más precisa de la intensidad de lluvia.
- Identificación de los tipos de precipitación en los pronósticos invernales.
- Distinción entre lluvia pesada y granizo.
- Predicción fiable de riadas, inundaciones, tornados y otros peligros climáticos.
- Reducción del efecto de los ecos no debidos a partículas meteorológicas (ruido).
- Detección de riesgos para la aviación, como las bandadas de pájaros y las condiciones de congelación.
- Un ahorro anual estimado en 700 millones de dólares.





**Fig. 10.** Ejemplo de funcionamiento de un algoritmo de clasificación empleado para la detección del granizo (indicado como HA) [4].

A finales de Abril de 2013, Estados Unidos completó la actualización de su red de radares meteorológicos a tecnología de doble polarización. En total, se actualizaron 161 estaciones de observación del clima, lo que supuso el mayor avance en el campo de la meteorología desde la instalación de los radares Doppler a principios de la década de los 90.

Una de las líneas de investigación que se encuentran abiertas actualmente se centra en el diseño de antenas *phased array* para sustituir a las antenas de reflector tradicionales. Los nuevos dispositivos serían capaces de realizar el barrido electrónico del haz, trabajar con varios haces y frecuencias simultáneamente, y reducir hasta cuatro veces el tiempo de escaneo volumétrico del radar. Los principales inconvenientes, como en la mayoría de las antenas de *array*, son su coste elevado y la complejidad del diseño, aunque lo primero podría compensarse gracias al ahorro estimado en los próximos años, derivado del uso de una nueva y más avanzada tecnología.

### 1.5 Radares polarimétricos en España

En el caso de España, existen sólo dos radares meteorológicos que operen con tecnología de doble polarización: uno se encuentra en Galicia, en la cima del monte Xesteiras (municipio de Cuntis, Pontevedra), y el otro en el País Vasco, en el monte Kapildui (Bernedo, Álava). Ninguna de estas instalaciones pertenece a la red de la Agencia Estatal de Meteorología, sino que son gestionadas por las agencias gallega (MeteoGal [6]) y vasca (EuskalMet [7]). El radar vasco fue el primero de los dos en ser instalado, en el año 2005, mientras que el radar gallego entró en funcionamiento en 2011. Ambos territorios cuentan con unas condiciones meteorológicas

difíciles dada su proximidad al océano Atlántico, por lo que los modernos radares polarimétricos ayudan a predecir con mayor anticipación las posibles tormentas.

En cuanto a sus especificaciones técnicas, el radar de Cuntis opera en banda C (4-8 GHz) y es capaz de realizar un escaneo completo del plano horizontal en un radio de más de 250 km, con una altura en el plano vertical de hasta 9 km (ángulo de elevación variable entre 0.15° y 15°). La torre sobre la que se encuentra el radar tiene 60 m de altura. Por su parte, el radar de Bernedo opera también en banda C, con un alcance máximo de 400 km. La antena parabólica del radar tiene un diámetro de 6 m, y el radomo que la protege de 9 m. La estructura de la torre se ha diseñado para soportar vientos de hasta 250 km/h.



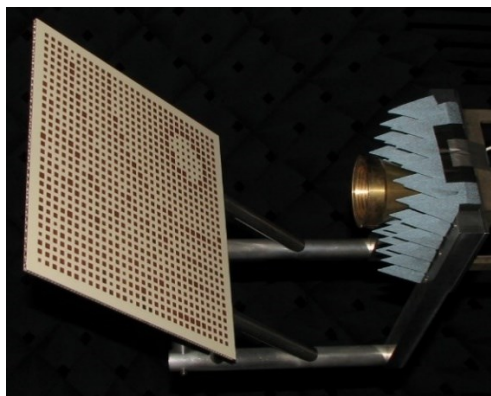
**Fig. 11.** Estación meteorológica de Cuntis (Pontevedra), dotada de radar polarimétrico.



**Fig. 12.** Estación meteorológica de Bernedo (Álava), dotada de radar polarimétrico.

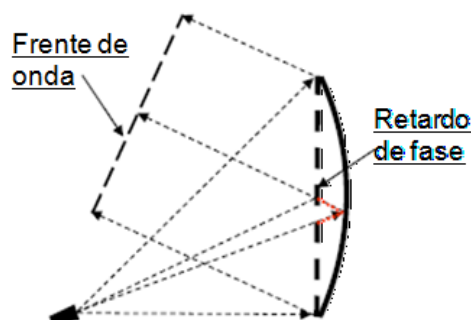
## 2. Antenas reflectoras planas en tecnología impresa

Una antena de tipo reflectarray se compone de una agrupación plana de elementos radiantes que proporcionan un determinado ajuste en la fase del campo eléctrico para generar un haz enfocado o conformado cuando la antena es iluminada por un alimentador [8]. Aunque en la superficie reflectora puede haber distintos tipos de elementos, como guías de onda terminadas en circuito abierto o cortocircuito (de hecho, así fue como se diseñaron los primeros reflectarrays a principios de los años 60), hoy en día lo más habitual es emplear elementos impresos en tecnología microstrip [9], que pueden presentar diversas formas geométricas (parches rectangulares, dipolos, anillos, etc.). En estos casos, basta con ajustar las dimensiones de los elementos impresos para conseguir el desplazamiento de fase necesario, siendo posible diseñar antenas de tamaño reducido y bajo coste con las mismas técnicas de fabricación de los circuitos impresos.



**Fig. 13.** Antena reflectarray de parches rectangulares.

En la Fig. 13 se muestra una imagen de una antena reflectarray formada por parches rectangulares. El campo electromagnético que incide en cada elemento procedente del alimentador (en este caso, una bocina cónica) puede ser considerado localmente como una onda plana, con una fase proporcional a la distancia entre el centro de fases del alimentador y dicho elemento. Para poder convertir la onda esférica radiada por el alimentador en un frente de onda plano, cada elemento debe reflejar el campo incidente con un cierto ajuste de fase que compense las diferencias de caminos recorridos desde el alimentador. Esta operación es similar en concepto a la de un reflector parabólico, que utiliza su curvatura para generar un frente de onda plano cuando es iluminado por un alimentador situado en su foco (ver Fig. 14).



**Fig. 14.** Compensación del retardo de fase en un reflectarray [8].

## 2.1 Ventajas e inconvenientes de los reflectarrays

Al igual que un reflector parabólico, el reflectarray puede alcanzar muy buenas eficiencias (>50%) para aperturas grandes, debido a que no se necesita ninguna red de alimentación como en el caso de los *arrays* de antenas, y sólo presenta unas pequeñas pérdidas de inserción de carácter resistivo. Por otra parte, al igual que los *arrays* convencionales, el reflectarray puede diseñarse para que su haz de radiación presente ángulos de inclinación elevados, del orden de 50º respecto a la dirección perpendicular a su superficie. Para obtener grandes ángulos de barrido del haz, pueden incorporarse a los elementos del reflectarray desfasadores electrónicos de bajas pérdidas. Con esta capacidad para efectuar un barrido amplio del haz, no hacen falta las complejas redes de conformación ni los módulos amplificadores para transmisión y recepción de los *arrays* convencionales.

Una ventaja significativa de los reflectarrays cuando se trabaja con grandes aperturas (por ejemplo, para antenas de espacio), es que permiten mecanismos de despliegue mucho más sencillos y fiables que los empleados por un receptor parabólico, que cuenta con una superficie doblemente curvada. La superficie plana del reflectarray asegura un montaje fácil en el satélite, sin causar un incremento significativo de peso o volumen en la estructura final. Esta característica de los reflectarrays, aunque a menor escala, puede observarse en la Fig. 15, donde se muestra una antena plegable de doble reflectarray diseñada para comunicaciones de emergencia por satélite.



(a)

(b)

**Fig. 15.** Antena reflectarray transportable: (a) desplegada, (b) recogida [10].

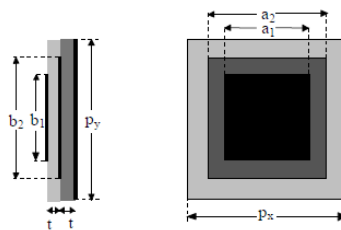
Al igual que un reflector parabólico, los reflectarrays pueden generar haces múltiples cuando son iluminados por varios alimentadores situados en el área focal de la antena. Por otro lado, la capacidad para implementar desfases diferentes en cada polarización, o a distintas frecuencias, permite que una única superficie reflectarray pueda producir varios haces en distintas direcciones, aun estando iluminada por un único alimentador. Esta capacidad para discriminar en polarización o en frecuencia supone una ventaja con respecto a los reflectores parabólicos, con los que es necesario utilizar varios alimentadores situados en posiciones distintas para generar haces en diferentes direcciones.

Otra característica importante de este tipo de antenas es que, teniendo un elevado número de elementos y capacidad para ajustar la fase en cada uno de ellos, puede conformar formas de haz muy precisas utilizando técnicas de síntesis de fase. Esto permite que pueda ser empleado para proporcionar cobertura a una cierta área geográfica (por ejemplo, el continente europeo), sin más que realizar un ajuste en las dimensiones de los elementos, de manera que el

proceso de fabricación sigue siendo el mismo que para un reflectarray de haz enfocado. Esto supone una importante reducción en los costes para este tipo de antenas, por lo general reflectores conformados cuya fabricación requiere de costosos moldes metálicos.

Frente a las ventajas enunciadas, los reflectarrays tienen como principal inconveniente un reducido ancho de banda de funcionamiento, que normalmente se encuentra en torno a un 10% de la frecuencia central del diseño. Para un reflectarray impreso en tecnología microstrip, el ancho de banda está fundamentalmente limitado por dos factores: el ancho de banda de los elementos impresos (que suele ser entre un 3% y un 5%), y la variación con la frecuencia de los retardos de fase asociados al trayecto recorrido por los rayos desde el alimentador (factor que afecta más gravemente cuanto mayor es el tamaño de la antena).

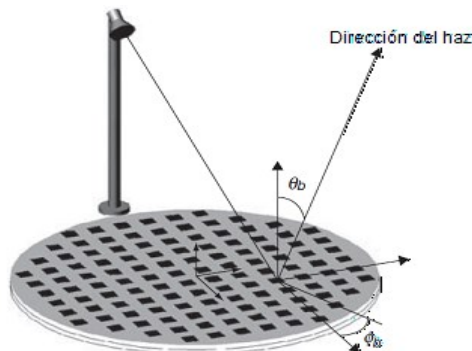
En los últimos años se han propuesto distintas soluciones para mejorar el ancho de banda, como las estructuras formadas por varias capas apiladas (ver Fig. 16), el empleo de nuevos elementos reflectarray con funcionamiento en banda ancha, el diseño con compensación del retardo real de fase (*true-time delay*) y las técnicas de optimización en frecuencia. Además, en el caso de antenas de gran tamaño, se han presentado algunos diseños de reflectarrays curvados de forma cóncava, realizados con áreas planas más pequeñas. Empleando estas técnicas, se han alcanzado anchos de banda de hasta un 30%.



**Fig. 16.** Elemento reflectarray con dos niveles de parches apilados.

## 2.2 Obtención de la distribución de fases

Para que un reflectarray pueda generar un haz enfocado en una cierta dirección, cada elemento debe introducir un determinado desplazamiento en la fase del campo incidente. El cálculo de los desplazamientos de fase necesarios en cada elemento constituye siempre el primer paso para el diseño de una antena reflectarray. Después, ese desfase puede lograrse mediante distintos tipos de celdas periódicas (parches, dipolos, anillos, etc), generalmente ajustando las dimensiones de los elementos impresos hasta fijar la fase del coeficiente de reflexión de cada celda al valor deseado.



**Fig. 17.** Representación de una antena reflectarray [8].

Considerando el sistema de coordenadas representado en la Fig. 17, la distribución de fase progresiva en la superficie de un reflectarray para producir un haz colimado en la dirección  $(\theta_b, \phi_b)$ , conocida por la teoría de *arrays*, puede expresarse como:

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 x_i \sin\theta_b \cos\phi_b - k_0 y_i \sin\theta_b \sin\phi_b$$

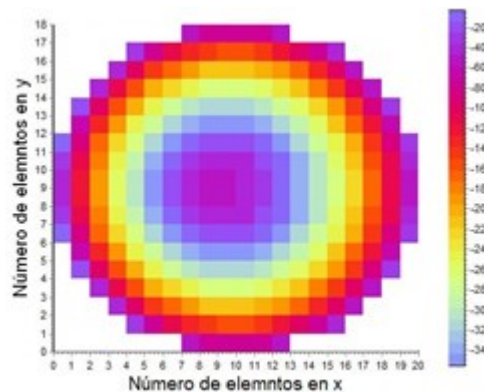
donde  $k_0$  es la constante de propagación en el espacio libre y el par  $(x_i, y_i)$  son las coordenadas del elemento 'i' del reflectarray. Por otro lado, la fase del campo reflejado en cada elemento es igual a la fase del campo incidente (como resultado de la propagación desde el alimentador) más el desplazamiento de fase introducido por el elemento:

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 d_i + \phi_R(x_i, y_i)$$

donde  $\phi_R$  es la fase del coeficiente de reflexión, o desplazamiento de fase, del elemento 'i', y  $d_i$  es la distancia desde el centro de fases del alimentador hasta la celda considerada. Igualando las dos expresiones anteriores, se obtiene que el desplazamiento de fase introducido en cada elemento debe ser igual a:

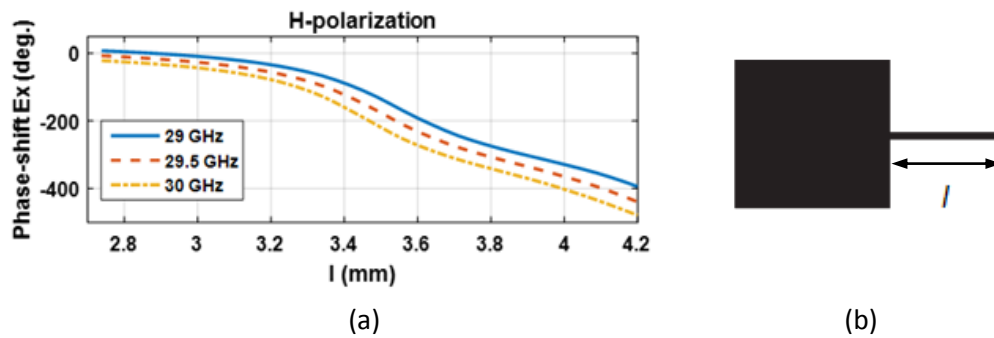
$$\phi_R = k_0 (d_i - (x_i \cos\phi_b + y_i \sin\phi_b) \sin\theta_b)$$

En la Fig. 18 se puede observar la distribución de fase requerida por un reflectarray circular de 20 x 18 elementos, con un alimentador situado sobre la perpendicular que pasa por su centro, para producir un haz enfocado en la dirección normal a su superficie ( $\theta_b = 0^\circ$ ,  $\phi_b = 0^\circ$ ). Como se ve en la figura, la variación de la fase se produce en forma de círculos concéntricos, cambiando de valor de manera progresiva desde el centro hasta los bordes de la antenna, de manera que aquellos elementos que se encuentran a la misma distancia del alimentador deben introducir el mismo desplazamiento de fase. Estas distribuciones son típicas de los reflectarrays diseñados para generar haces enfocados.



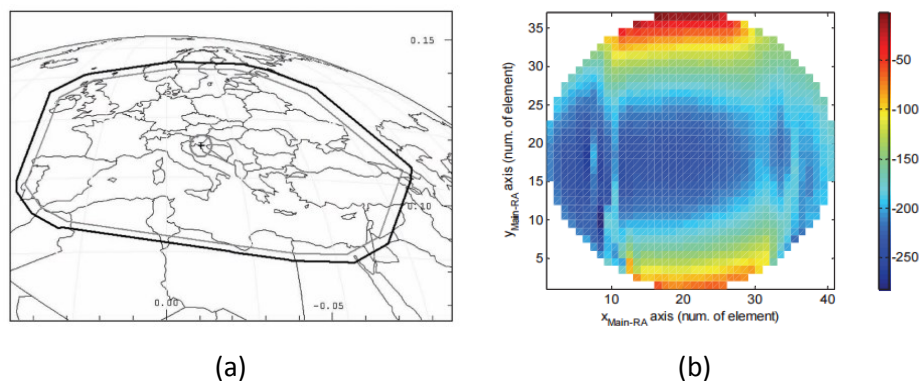
**Fig. 18.** Distribución de fase requerida para colimar el haz.

El siguiente paso del diseño de un reflectarray consistiría en ajustar la fase del coeficiente de reflexión de cada elemento para hacerla coincidir con el desplazamiento de fase objetivo. Normalmente, se busca conseguir una variación lo más lineal posible de la fase del coeficiente de reflexión con respecto a una de las variables geométricas del elemento empleado. Por ejemplo, una implementación clásica con parches microstrip rectangulares consistiría en conectar segmentos de línea de transmisión de diferentes longitudes a los elementos impresos. La longitud de la línea determinaría el valor de la fase del coeficiente de reflexión, con una variación similar a la mostrada en la Fig. 19.



**Fig. 19.** Curvas de variación de la fase del coeficiente de reflexión (a) con respecto a la longitud de la línea de transmisión del elemento (b).

Por último, cabe destacar que existe también la posibilidad de llevar a cabo un ajuste de fase independiente para cada elemento impreso, generando así un haz conformado. Mediante un método de diseño denominado síntesis de sólo fase (*phase-only synthesis*), puesto que la amplitud ya viene fijada por la distancia del alimentador a la superficie del reflectarray, se calcula el desfase necesario que debe introducir cada elemento de forma que el diagrama de radiación cumpla con las especificaciones de una cierta máscara. En este caso, las distribuciones de fase no presentan el mismo patrón circular que en el caso de los haces enfocados, como puede observarse en la Fig. 20.



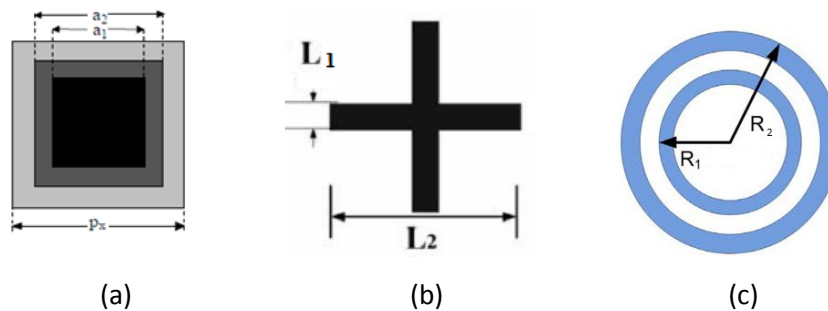
**Fig. 20.** Haz conformado para proporcionar cobertura europea (a) y distribución de fase necesaria obtenida mediante el método de sólo fase (b) [11].

### 2.3 Tipos de elementos impresos

En cuanto al tipo de elemento reflectarray a utilizar, existe una gran variedad de formas y configuraciones posibles, en función de si se diseña para polarización lineal o circular, a una o a varias frecuencias, buscando un mayor ancho de banda, etc. La respuesta en fase del elemento debe ser analizada en detalle para comprobar si cumple con los requisitos necesarios para el diseño de la antena.

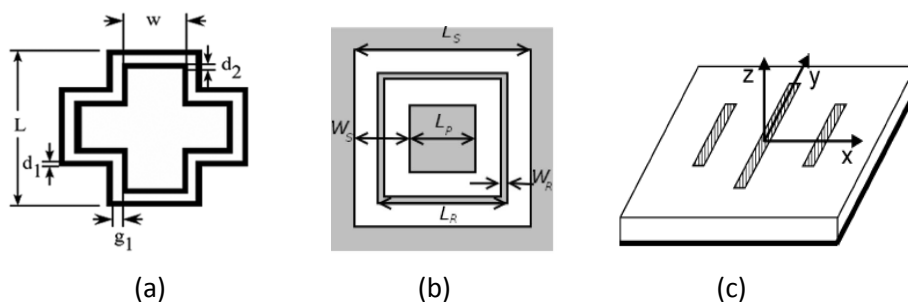
Los parches rectangulares, por ejemplo, permiten el control de fase independiente en dos polarizaciones lineales ortogonales sin más que ajustar sus dimensiones horizontal y vertical, aunque el ancho de banda resultante es pequeño. Otra opción para trabajar en polarización lineal pueden ser los dipolos en cruz o las agrupaciones de dipolos paralelos. Los elementos compuestos por anillos se suelen emplear para controlar la respuesta de fase en polarización

circular, aunque el desfasaje introducido afecta por igual a la polarización circular a derechas (RHCP) y a izquierdas (LHCP). Una estrategia muy empleada para lograr una respuesta selectiva en una de las dos polarizaciones circulares consiste en dejar una serie de intervalos, dispuestos de manera apropiada, en el trazado del anillo. En la Fig. 21 se representan algunos de los elementos citados.



**Fig. 21.** Elementos reflectarray basados en parches rectangulares (a), dipolos en cruz (b) y anillos concéntricos (c).

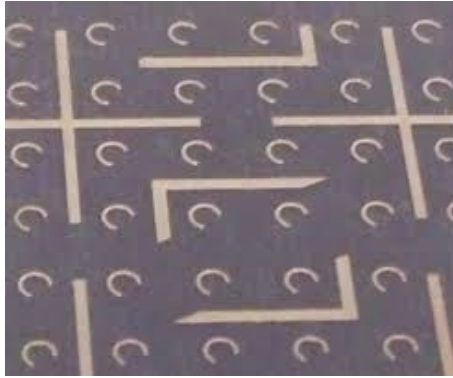
Para resolver el problema del limitado ancho de banda de los reflectarrays, se han propuesto diversas configuraciones con elementos multi-resonantes impresos en una única capa de dieléctrico, como los anillos concéntricos cuadrados o en cruz, la denominada celda de Phoenix o los ya mencionados dipolos paralelos (ver Fig. 22). También se han empleado estructuras de varias capas, como por ejemplo las formadas por parches rectangulares apilados, aunque éstas tienen los inconvenientes de un mayor volumen, peso y coste de fabricación. Como prueba de ello, se ha demostrado que el elemento compuesto por tres dipolos paralelos que se muestra en la Fig. 22 proporciona el mismo ancho de banda y margen de fases que el formado por tres capas de parches apilados, siendo considerablemente más barato y sencillo de fabricar [12].



**Fig. 22.** Elementos reflectarray basados en anillos concéntricos (a), celda de Phoenix (b) y dipolos paralelos (c).

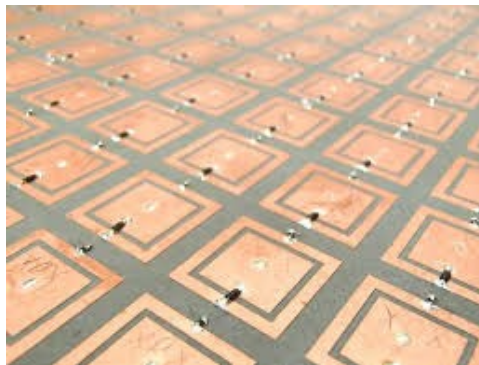
En el caso de reflectarrays que operen a varias frecuencias, se suele optar por configuraciones de una sola capa con diferentes elementos reflectarray que controlen la respuesta en fase a cada una de las frecuencias, o bien por estructuras de varias capas reflectarray apiladas, una para cada frecuencia. Un ejemplo de la primera técnica de diseño puede verse en la Fig. 23, donde se utilizan tres tipos de elementos basados en anillos, dipolos en cruz y bucles cuadrados para poder generar un haz colimado a tres frecuencias distintas (7, 8.5 y 32 GHz). En cuanto a la segunda técnica, se han llegado a proponer estructuras multicapa formadas por varios niveles de parches rectangulares, bucles cuadrados, dipolos paralelos y anillos.





**Fig. 23.** Reflectarray multi-frecuencia de una sola capa [13].

Por último, también se han realizado avances significativos en el desarrollo de reflectarrays reconfigurables, mediante el empleo de conmutadores (interruptores con tecnología MEM, diodos PIN, etc.) que pueden modificar las propiedades de radiación de la antena, como su dirección de apuntamiento. Un buen ejemplo de ello son las celdas reflectarray con diodos varactores controlados por tensión (ver Fig. 24), y para aplicaciones en la banda de 100 a 300 GHz, las celdas de cristal líquido. Estas antenas pueden ser utilizadas en aplicaciones que requieran de barrido o conmutación del haz, puesto que son fácilmente reconfigurables a través de un cambio en la tensión aplicada a la celda.



**Fig. 24.** Reflectarray reconfigurable usando diodos varactores [14].

### **3. Aplicación de los reflectarrays a los radares polarimétricos**

Las antenas reflectarray cuentan con una serie de características que las vuelven muy interesantes para su utilización en sistemas de comunicaciones por satélite, punto a multipunto, o radar. A pesar de ello, la tecnología reflectarray se encuentra todavía en fase de desarrollo y consolidación: si bien en los últimos años se han logrado avances importantes en cuanto a funcionalidad y prestaciones ofrecidas, todavía no han conseguido desplazar a los reflectores parabólicos, empleados actualmente en la mayoría de potenciales aplicaciones de los reflectarrays y que constituyen una tecnología ya madura y asentada.

En el caso de los radares meteorológicos, ciertas propiedades de los reflectarrays hacen que estos puedan llegar a ser considerados como una opción a tener en cuenta para su implementación en este tipo de sistemas. De hecho, el empleo de los reflectarrays como antenas de radar meteorológico ya ha sido planteado en algunas publicaciones en congresos científicos



internacionales durante los últimos años [15] [16], teniendo especial interés en el caso de los radares polarimétricos, en los que se requiere de una antena capaz de transmitir y recibir en doble polarización lineal. Concretamente, las principales características de los reflectarrays que pueden ser de utilidad para el diseño de antenas de radar polarimétrico son las siguientes:

- Altos valores de ganancia y eficiencia de radiación, pero con una solución de bajo coste. Los reflectarrays, a diferencia de los *arrays* convencionales, no requieren de complejas redes de alimentación o de conformación del haz. Además, el empleo de la tecnología de circuito impreso facilita y reduce los costes de su fabricación.
- Control independiente de cada polarización: algunos elementos reflectarray, como los parches rectangulares [17] o las agrupaciones ortogonales de dipolos paralelos [18], permiten ajustar la fase de manera independiente en cada una de las dos polarizaciones lineales (horizontal y vertical). Esto permite generar haces diferentes en cada polarización, ya sean de tipo conformado para proporcionar cobertura a una cierta área geográfica, o haces enfocados para enlaces punto a punto por satélite.
- Bajo nivel de polarización cruzada: el aislamiento entre las dos polarizaciones del campo eléctrico debe ser muy alto para evitar problemas en el procesamiento de las medidas de reflectividad de un radar polarimétrico. Las antenas reflectarray permiten aplicar técnicas de reducción de polarización cruzada para que el efecto de la señal radiada en una polarización sea pequeño en la componente ortogonal [19].
- Antenas reconfigurables con capacidad de escaneo del haz: las antenas reflectarray permiten trabajar con grandes ángulos de escaneo del haz, lo que unido al empleo de diodos varactores, MEMs y otros conmutadores puede dar lugar a antenas de haz reconfigurable [20]. Esta propiedad, por ejemplo, permitiría al radar realizar el escaneo en el plano de elevación de manera electrónica.

Además de su instalación en estaciones terrenas, también es posible incorporar este tipo de radares a bordo de aeronaves y vehículos espaciales, con objeto de estudiar la meteorología de la Tierra y de otros planetas. De hecho, existe el precedente de un caso real en el que se valoró seriamente la posibilidad de desarrollar una antena reflectarray como parte de un radar meteorológico para una aplicación de este tipo.

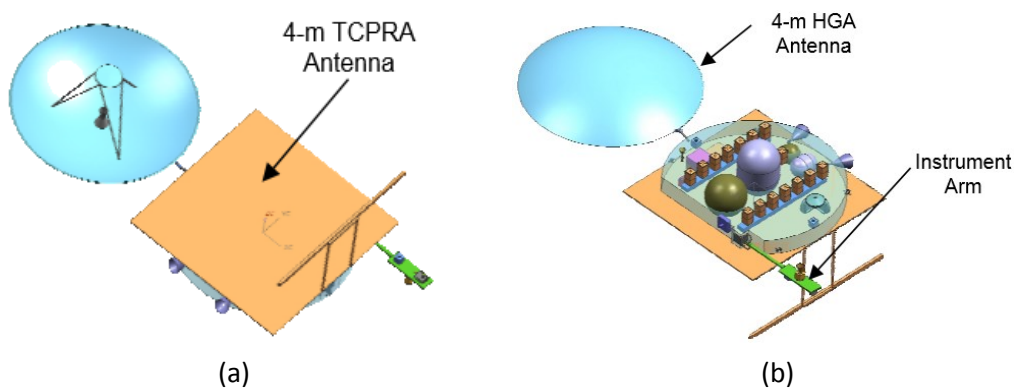
### **3.1 El proyecto “Titan Cloud/Precipitation Radar and Altimeter”**

El proyecto “Titan Cloud/Precipitation Radar and Altimeter” (TCPRA) fue impulsado por la NASA como parte de la misión “Titan Orbiter” con el fin de desarrollar un radar meteorológico con el que explorar la atmósfera y la topografía de Titán, el principal satélite de Saturno y el segundo más grande del Sistema Solar. Se planteó como una continuación natural a la misión “Cassini-Huygens” [21], que ya había permitido recabar los primeros datos acerca de dicho satélite mediante el envío de una sonda, *Huygens*, que aterrizó en su superficie y transmitió información a la Tierra durante un tiempo aproximado de una hora y media.

Las especificaciones del proyecto TCPRA incluían diseñar una antena de 4 m de diámetro para operar a dos frecuencias, 14 y 35 GHz, con una anchura de haz a -3 dB menor de 0.15° y capacidad de escaneo del haz hasta  $\pm 20^\circ$ . Por otro lado, el sistema de radar meteorológico a implementar contaría con una longitud de los pulsos transmitidos de entre 10 y 40  $\mu$ s, frecuencia de repetición de pulsos de 3 kHz, potencia media de 1.2 kW (con una potencia de pico de 3 kW),

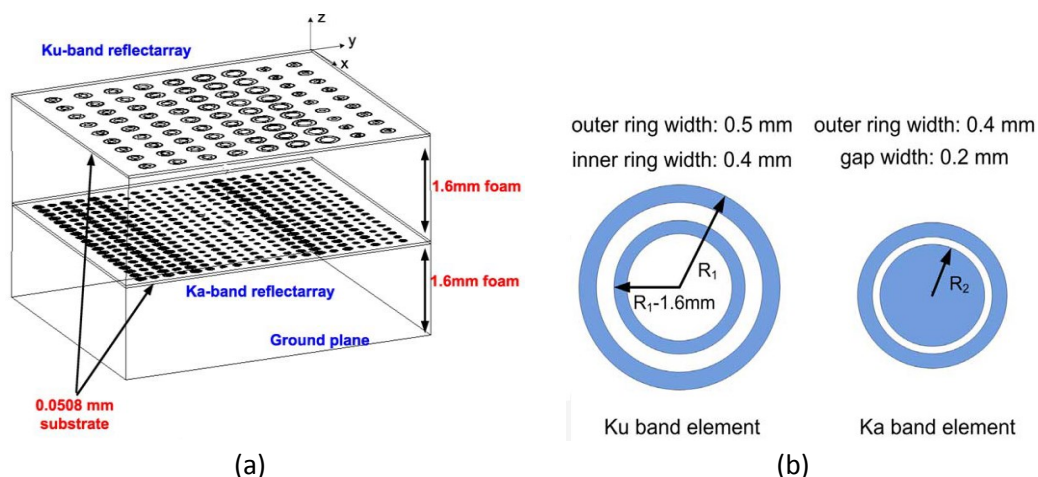
ancho de banda de 3 MHz, precisión de 0.7 m/s en las medidas Doppler de velocidad, resolución horizontal de 3.4 km, resolución vertical de 250 m y un enlace de datos a 10 Mbps para enviar la información de las medidas. La masa total del módulo TCPRA sería de unos 400 kg.

Una de las principales propuestas para llevar a cabo la antena del radar consistió en un reflectarray capaz de operar en las bandas Ku (14 GHz) y Ka (35 GHz), alimentado por dos *arrays* lineales en configuración descentrada, con un funcionamiento equivalente al de un reflector cilíndrico [22]. La antena se encargaría de conformar el haz en el plano vertical (plano H), funcionando como un espejo en el plano horizontal (plano E), siendo en este caso el *array* lineal utilizado como alimentador el encargado de conformar el haz y proporcionar el escaneo del mismo. Una reproducción del aspecto del módulo TCPRA, incluyendo la antena reflectarray, puede verse en la Fig. 25.



**Fig. 25.** Vistas del módulo TCPRA con antena reflectarray: (a) superior, (b) inferior.

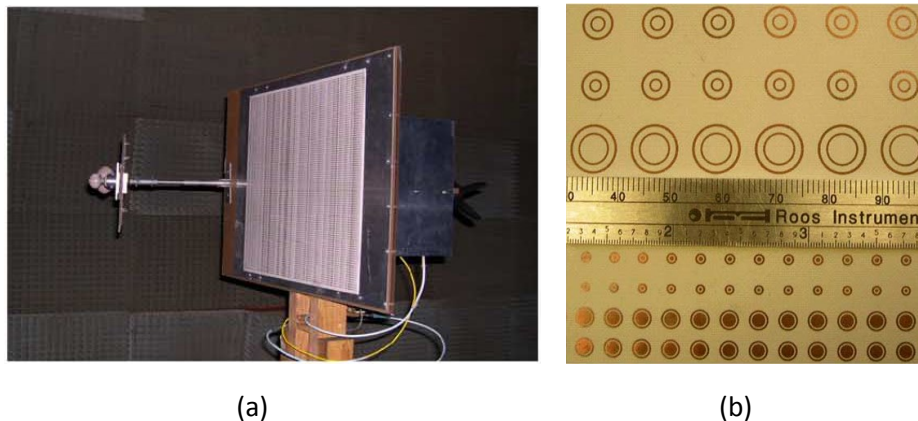
El reflectarray diseñado para formar parte del radar presentaba una configuración de dos capas: la superior contenía los elementos encargados de controlar la respuesta de la antenna a 14 GHz, mientras que los elementos de la capa inferior hacían lo propio con la respuesta a 35 GHz. Se emplearon dos tipos de elementos basados en anillos circulares de radio variable, dispuestos en una rejilla rectangular con un periodo de 12 mm en la capa superior y de 5.5 mm en la capa inferior. En la Fig. 26 se muestra una representación de la estructura del reflectarray, así como la geometría y las dimensiones de los elementos impresos.



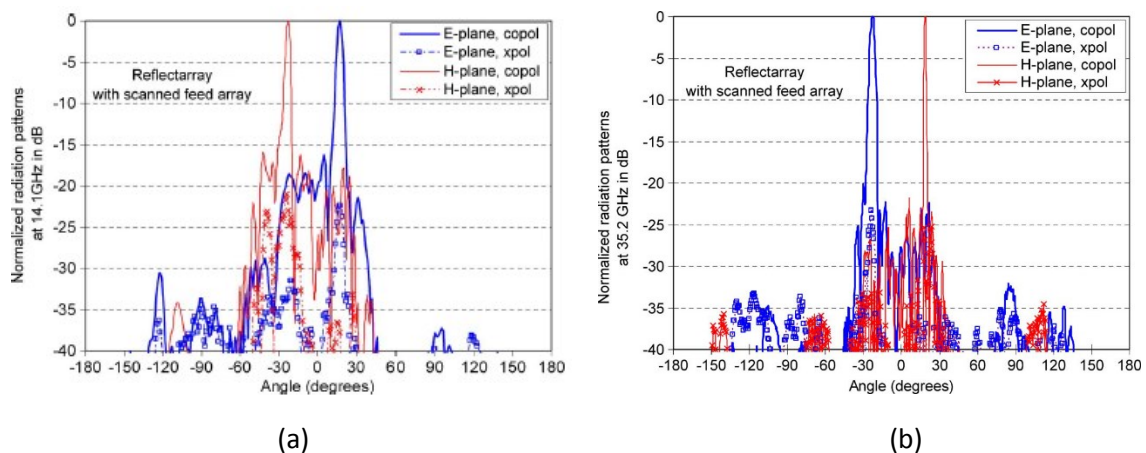
**Fig. 26.** Antena reflectarray para el módulo TCPRA: (a) estructura del reflectarray, (b) geometría de los elementos [22].

La idea que se perseguía con esta configuración era que los elementos superiores fueran casi transparentes para la onda incidente a la frecuencia de diseño de la capa inferior (35 GHz), mientras que a la otra frecuencia de operación (14 GHz) la señal sería reflejada directamente por los elementos superiores. De esta forma se lograba el funcionamiento simultáneo a dos frecuencias, aunque en este caso la simetría de los elementos impresos da lugar a que la antena genere el mismo diagrama de radiación en las dos polarizaciones.

En el año 2007 se construyó y midió un prototipo a pequeña escala (50 cm de lado) de la antena reflectarray de dos capas del proyecto TCPRA. Las medidas se llevaron a cabo en la cámara anecoica de la Universidad de Texas. En la Fig. 27 pueden observarse algunas fotografías del demostrador en la cámara anecoica y el detalle de los elementos impresos. En la Fig. 28 se muestran los diagramas de radiación normalizados obtenidos para un haz radiado con un ángulo de  $20^\circ$  respecto a la normal en los planos E y H. Los diagramas muestran las componentes co-polar y contra-polar a 14 y 35 GHz, que son las dos frecuencias de operación de la antena.



**Fig. 27.** Fotografías del prototipo fabricado: (a) en la cámara anecoica, (b) detalle de los elementos impresos [22].



**Fig. 28.** Superposición de los diagramas de radiación normalizados medidos en los planos E y H: (a) a 14 GHz, y (b) a 35 GHz [22].

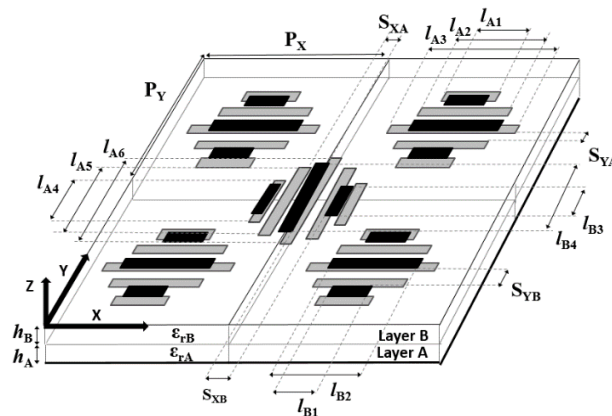
Por aquel entonces, se estimaba que el vehículo espacial con el módulo TCPRA sería lanzado en el año 2015, viajaría hasta Titán y pasaría un mínimo de dos años allí, realizando un estudio detallado de su atmósfera, nubes, precipitaciones, topografía, etc. Sin embargo, en el año 2009 el proyecto fue dejado de lado por motivos económicos para dar prioridad a otra

misión de exploración sobre el planeta Júpiter, por lo que la antena reflectarray propuesta para el radar nunca llegó a fabricarse.

El principal mérito de este trabajo radica en el hecho de diseñar un reflectarray capaz de operar a dos frecuencias distintas con una estructura relativamente sencilla, empleando únicamente dos capas de dieléctrico con elementos impresos. El único inconveniente es que no permite un control independiente de las dos polarizaciones lineales, debido a la simetría de los elementos. Pese a ello, el trabajo constituye una aportación significativa al diseño de reflectarrays multi-frecuencia para aplicaciones de radar meteorológico.

### 3.2 Reflectarrays con control de fase independiente en cada polarización

En los últimos años, el desarrollo de la tecnología reflectarray ha posibilitado la aparición de nuevos elementos que sí permiten un control independiente de cada polarización, incluso operando simultáneamente a distintas frecuencias. En la Fig. 29 puede verse una representación del elemento propuesto en [23] para operar a 20 y 30 GHz en doble polarización lineal, horizontal y vertical. Si bien en este caso las frecuencias utilizadas se corresponden con los enlaces ascendente y descendente en la banda Ka de un satélite de comunicaciones, las dimensiones del elemento podrían modificarse para que las frecuencias de funcionamiento fueran otras distintas. El principal inconveniente de esta estructura es su reducido ancho de banda, pero para este tipo de aplicaciones meteorológicas no supondría un gran problema.



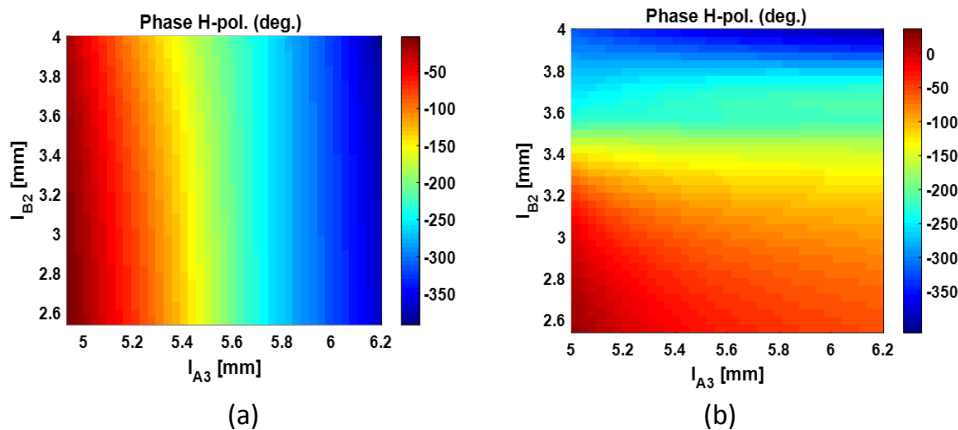
**Fig. 29.** Elemento reflectarray de dos capas compuesto por agrupaciones ortogonales de dipolos paralelos [23].

El elemento propuesto se compone de dos agrupaciones ortogonales de cinco dipolos paralelos, impresos sobre una lámina de material dieléctrico (a la que denominaremos capa A), sobre los que se sitúan otros dos conjuntos ortogonales de tres dipolos paralelos, impresos en la cara superior de una segunda lámina de dieléctrico (capa B). Los dipolos laterales de cada agrupación son simétricos con respecto al dipolo central, para mantener un bajo nivel de radiación contra-polar.

El periodo de la celda se escoge como  $0.66 \cdot \lambda$  a la frecuencia más alta (30 GHz), por lo que  $P_X = P_Y = 6.5$  mm. La anchura de los dipolos es  $w = 0.25$  mm, la separación lateral entre dipolos acoplados en la capa inferior es  $S_{XA} = S_{YA} = 0.5$  mm, y en la superior  $S_{XB} = S_{YB} = 1$  mm. Las longitudes relativas de los dipolos laterales respecto al dipolo central de cada agrupación son:  $l_{A1} = 0.65 \cdot l_{A3}$ ,  $l_{A2} = 0.8 \cdot l_{A3}$ ,  $l_{A4} = 0.65 \cdot l_{A6}$ ,  $l_{A5} = 0.8 \cdot l_{A6}$  en la capa inferior (donde  $l_{A6}$  y  $l_{A3}$  representan las longitudes de los dipolos centrales en dirección X e Y, respectivamente) y  $l_{B1} = 0.8 \cdot l_{B2}$ ,  $l_{B3} =$

$0.8 \cdot l_{B4}$  en la capa superior (donde  $l_{B4}$  y  $l_{B2}$  se corresponden con las longitudes de los dipolos centrales en dirección X e Y, respectivamente). Todos estos parámetros han sido escogidos para lograr una variación suave de la respuesta en fase del elemento en un rango mayor de  $360^\circ$ , tanto a 20 GHz como a 30 GHz, tal como se explicó en el apartado 2.2.

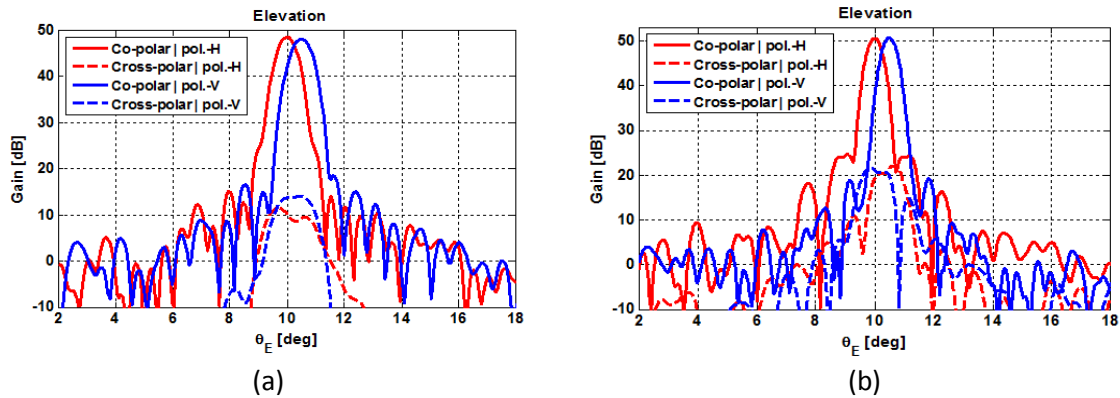
En cuanto al principio de funcionamiento del elemento, los dipolos de la capa inferior presentarán una longitud mayor que la de los dipolos superiores, de forma que estos no perturbarán la respuesta en fase del reflectarray a 20 GHz, mientras que los dipolos inferiores se comportarán como un plano de masa para los dipolos de la capa superior a 30 GHz. Esta propiedad permite lograr un control de fase prácticamente independiente en cada una de las bandas de frecuencia basado en las longitudes de los dipolos superiores e inferiores, como puede observarse en la Fig. 30, que muestra la variación en la fase del coeficiente de reflexión a 20 y a 30 GHz para polarización horizontal e incidencia normal, en función de la longitud del dipolo central de cada capa en la dirección del eje X (nótese que para polarización V se obtiene la misma respuesta considerando los dipolos en la dirección del eje Y).



**Fig. 30.** Variación de la fase del coeficiente de reflexión para polarización H en función de las longitudes de los dipolos en la dirección del eje X: (a) a 20 GHz, (b) a 30 GHz [23].

Por otro lado, los dipolos en la dirección del eje X controlarán la respuesta en fase de la antena en polarización horizontal, mientras que los dipolos en la dirección del eje Y harán lo mismo con la respuesta en fase en polarización vertical. El control independiente de fase en las dos polarizaciones lineales mediante agrupaciones ortogonales de dipolos paralelos ya fue demostrado en [18], presentando un comportamiento muy similar al mostrado en los gráficos de la Fig. 30, solo que esta vez comparando las variaciones de fase debidas a las longitudes de los dipolos centrales en X y en Y de cada capa.

Una vez caracterizado el elemento, es posible utilizarlo para el diseño de reflectarrays a dos frecuencias con haces independientes en cada polarización. Las longitudes de los dipolos pueden ajustarse de manera separada para cada agrupación de dipolos paralelos situada en una misma capa, simplificando el proceso de diseño y ahorrando bastante tiempo de computación. Los resultados obtenidos mediante esta técnica a las dos frecuencias de diseño son razonablemente buenos, siendo posible incluso utilizarlos como punto de partida para ejecutar rutinas de optimización que incrementen el ancho de banda de la antena. Como ejemplo, en la Fig. 31 se muestran los diagramas de radiación en el plano de elevación para un reflectarray circular de 1.6 m de diámetro con haces independientes a 20 y 30 GHz, separados  $0.5^\circ$ , en las polarizaciones horizontal y vertical.



**Fig. 31.** Diagramas de radiación simulados en el plano de elevación para un reflectarray circular de 1.6 m de diámetro: (a) a 20 GHz, (b) a 30 GHz [23].

#### 4. Conclusiones

Los radares meteorológicos son un tipo de dispositivos que permiten localizar precipitaciones, clasificarlas según su composición y estimar sus trayectorias. En los últimos tiempos, cada vez es más frecuente la instalación de radares polarimétricos o de doble polarización, que ofrecen mejores prestaciones que los radares tradicionales de una sola polarización: mayor número de variables medidas, estimaciones más precisas de la intensidad de lluvia, algoritmos de clasificación más complejos, detección del granizo, prevención de tornados, inundaciones, etc. Este tipo de radares requieren de antenas capaces de operar en doble polarización lineal, horizontal y vertical.

Por otro lado, en paralelo a la implantación de los radares polarimétricos, se ha venido produciendo un importante desarrollo de las antenas reflectoras planas en tecnología impresa, también denominadas reflectarrays, que combinan muchas de las ventajas de los reflectores parabólicos y los *arrays*. Un reflectarray se compone de una agrupación plana de elementos impresos que al ser iluminados por un alimentador introducen el desplazamiento de fase necesario en la onda incidente para generar un haz enfocado o conformado.

En este trabajo se ha propuesto la utilización de los reflectarrays como antenas de radares polarimétricos, aprovechando algunas de las características que pueden ser de más interés en este tipo de sistemas: generación de haces independientes en las polarizaciones horizontal y vertical, alta eficiencia de radiación, bajos costes de fabricación, reconfigurabilidad, etc. Aunque existen algunos precedentes al respecto, el empleo de reflectarrays en los sistemas de radar polarimétricos es todavía un campo por explorar.

#### 5. Bibliografía

- [1] David Atlas, "Radar in Meteorology", American Meteorological Society, Boston, 1990.
- [2] Página web de la Agencia Estatal de Meteorología: [www.aemet.es](http://www.aemet.es)
- [3] NEXRAD Technical Information (Radar Operation Centre, NOAA's National Weather Service): <https://www.roc.noaa.gov/wsr88d/Engineering/NEXRADTechInfo.aspx>
- [4] A. V. Ryzhkov, T. J. Schuur, D. W. Burgess, P. L. Heinselman, S. E. Giangrande and D. S. Zrnic, "The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, no. 6, pp. 809-824, June 2005.



- [5] H. Park, A. V. Ryzhkov, D. S. Zrnica, K. E. Kim, "The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS", *Wheater and Forecasting*, vol. 24, no. 3, pp. 730-748, June 2009.
- [6] Página web de la Agencia Gallega de Meteorología: [www.meteogalicia.gal](http://www.meteogalicia.gal)
- [7] Página web de la Agencia Vasca de Meteorología: [www.euskalmet.euskadi.net](http://www.euskalmet.euskadi.net)
- [8] John Huang and José A. Encinar, "Reflectarray antennas", *IEEE Press/Wiley*, Piscataway, NJ/New York, 2008.
- [9] David M. Pozar and Daniel H. Schaubert, "Microstrip antennas", *IEEE Press/Wiley*, Piscataway, NJ/New York, 1995.
- [10] S. Montori, F. Cacciamani, R. V. Gatti, R. Sorrentino, G. Arista, C. Tienda, J. A. Encinar, G. Tosso, "A Transportable Reflectarray Antenna for Satellite Ku-band Emergency Communications", *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 63, no. 4, pp. 1393-1407, April 2015.
- [11] C. Tienda, J. A. Encinar, M. Arrebola, "Contoured beam dual reflectarray antenna for DBS applications", *IEEE International Symposium on Antennas & Propagation*, Washington, USA, July 2011.
- [12] R. Florencio, R. R. Boix, J. A. Encinar, "Comparative study of reflectarrays based on cells with three coplanar dipoles and reflectarrays based on cells with three stacked patches," *6th European Conference on Antennas & Propagation*, Prague, Czech Republic, March 2012.
- [13] A. Yu, F. Yang, Elsherbeni, J. Huang, "Experimental demonstration of a single layer tri-band circularly polarized reflectarray", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Toronto, Canada, July 2010.
- [14] A. Tayebi, J. Tang, P. R. Paladhi, L. Udpa, S. S. Upda, E. J. Rothwell, "Dynamic Beam Shaping Using a Dual-Band Electronically Tunable Reflectarray Antenna", *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 63, no. 10, pp. 4534-4539, Oct. 2015.
- [15] Y. Pan and Y. Zhang, "A Reflectarray Design with Gapped Ring Elements and Reduced Cross-Polarization for Polarimetric Radar", *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, October 2013.
- [16] R. Romanofsky, C. Mueller, C. V. Chandrasekar, "Concept for a Low Cost, High Efficiency Precipitation Radar System Based on Ferroelectric Reflectarray Antenna", *IEEE Radar Conference*, May 2009.
- [17] J. A. Encinar, L. S. Datashvili, J. A. Zornoza, M. Arrebola, M. Sierra-Castaner, J. L. Besada-Sanmartin, H. Baier, H. Legay, "Dual-Polarization Dual-Coverage Reflectarray for Space Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 10, pp. 2827-2837, April 2006.
- [18] R. Florencio, J. A. Encinar, R. R. Boix, V. Losada, G. Toso, "Reflectarray Antennas for Dual Polarization and Broadband Telecom Satellite Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 1234-1246, April 2015.
- [19] J. A. Encinar, M. Arrebola, "Reduction of Cross-Polarization in Contoured Beam Reflectarrays Using a Three-Layer Configuration", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Honolulu, Hawaii (USA), July 2007.
- [20] E. Carrasco, J. A. Encinar, J. Perruisseau-Carrier, "Evaluation of a Reflectarray with Independent Scanning of Two Linearly Polarized Beams", *6th European Conference on Antennas & Propagation*, Prague, Czech Republic, March 2012.
- [21] Cassini: Mission to Saturn (Jet Propulsion Laboratory, NASA): <https://saturn.jpl.nasa.gov>
- [22] S. H. Hsu, C. Han, J. Huang and K. Chang, "An Offset Linear-Array-Fed Ku/Ka Dual-Band Reflectarray for Planet/Cloud Precipitation Radar", *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 55, no. 11, pp. 3114-3122, Nov. 2007.
- [23] E. Martinez-de-Rioja, J. A. Encinar, R. Florencio, R.R. Boix, "Reflectarray in K and Ka bands with independent beams in each polarization *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Fajardo, Puerto Rico, June 2016.