

EL RADAR METEOROLÓGICO DOPPLER: BENEFICIARSE DE LA INNOVACIÓN

Por R. BEACH*

Introducción

Desde que se desarrollaron los sistemas de radares meteorológicos prácticos, en los años 50, el radar ha llegado a ser el método preferido para detectar y seguir la trayectoria de los fenómenos meteorológicos intensos. Los avisos de temporal proporcionados por los sistemas de radares meteorológicos son sin duda alguna los responsables de haber salvado cientos, o quizás miles de vidas cada año en todo el mundo.

La constante mejora de la tecnología está ampliando la aplicación del radar meteorológico en campos tales como la seguridad de la aviación, la gestión del agua y las operaciones de las instalaciones eléctricas, además de proporcionar mejores avisos de fenómenos meteorológicos intensos. La sofisticada tecnología del radar también está proporcionando una nueva percepción de la estructura, crecimiento y disipación de las células de tormenta.

Este artículo intenta describir brevemente algunos de los progresos en la tecnología de los radares meteorológicos, algunos factores prácticos que afectan al funcionamiento de un radar y a los costes asociados a un nuevo radar meteorológico o a la modernización de uno ya existente.

Tecnología

Los radares meteorológicos producen imágenes de precipitación en la atmósfera mediante la medida de las señales del radar reflejadas en los hidrometeoros de la precipitación (gotas de lluvia, copos de nieve, granizo, etc.). Estas señales reflejadas son procesadas para extraer información sobre la precipitación. Según avanza la tecnología, estas técnicas de procesamiento son cada vez más sofisticadas.

El pasado

La primera generación de sistemas de radar estaban basados en la tecnología de un magnetrón transmisor y sólo medían la amplitud de las señales reflejadas. Un magnetrón es un tipo de tubo de electrones que se

completa con un transmisor contenido en él. Se requiere únicamente una pulsación de altos voltajes para generar las señales transmitidas por el radar. Hoy todavía se usan los magnetrones en la mayoría de los radares meteorológicos, debido a que son muy simples y tienden a ser menos costosos que otras tecnologías para transmisores.

Se han realizado numerosos experimentos para definir una relación consistente entre la amplitud de la señal reflejada y el contenido real de agua en la precipitación. Ya que la reflectividad se ve afectada por el tamaño, número y estado (líquido, hielo, etc.) de los hidrometeoros, una medida única de la reflectividad nos conduce al clásico caso de una ecuación con tres incógnitas. Como consecuencia, parece difícil de encontrar la medida exacta de la precipitación utilizando únicamente la amplitud de la señal reflejada.

La segunda generación de sistemas de radar meteorológicos añadió la capacidad Doppler. Esta permite al radar medir la velocidad del viento a lo largo del haz del radar con precipitación (velocidad radial) dentro de sus áreas de detección, pero aún no proporcionan ninguna información sobre el tamaño o estado del hidrometeoro. La velocidad se mide por comparación de la frecuencia del pulso recibido con la frecuencia del pulso transmitido. La diferencia de frecuencias es debida al desplazamiento de la frecuencia Doppler creado por el movimiento horizontal de los hidrometeoros. El desplazamiento de frecuencia se mide de forma típica denominada procesos de pares de pulsos. Una vez medido el desplazamiento de la frecuencia, puede calcularse de él la velocidad del viento. Estos desplazamientos de frecuencia son muy pequeños.

Esto plantea un importante problema para los radares de magnetrón. La naturaleza del magnetrón es tal que cada pulso es de una frecuencia ligeramente diferente y de fase aleatoria. Así, la medida directa Doppler de la velocidad es imposible. Este problema se afrontó añadiendo circuitos que, en efecto, "recuerden" la frecuencia del pulso más reciente transmitido. Estos circuitos se denominan generalmente oscilador local estable (STALO) y oscilador coherente (COHO). Los radares de magnetrón utilizan de forma general la salida COHO como referencia para el procesamiento

* Kavouras Inc., Burnsville, MN 55447, EE.UU.

de la velocidad con un par de pulsos. Además, el receptor de un radar de magnetrón requiere un circuito de control automático de la frecuencia (AFC) de modo que el receptor pueda seguir los cambios de frecuencia del magnetrón.

Muchos radares de la segunda generación utilizan también magnetrones coaxiales. El magnetrón coaxial ayuda a aislar al magnetrón de los factores externos (en particular, las características de la antena) que pueden afectar al funcionamiento del magnetrón. Sin embargo, un magnetrón coaxial no evita la básica variación de frecuencia y fase inherente a la operación del magnetrón.

La mayoría de los sistemas de radares actualmente en uso son de la primera o de la segunda generación.

El presente

La tercera generación de radares meteorológicos son radares Doppler que son totalmente coherentes. Esto significa que el tubo magnetrón ha sido reemplazado por un transmisor que es un verdadero amplificador, con una señal de precisión que opera continuamente. Los transmisores totalmente coherentes utilizan de forma general un tubo Klystron, un tubo de onda viajera o artefactos de estado sólido. Dado que cada pulso es una parte amplificada de la señal de precisión, todos los pulsos tienen una frecuencia idéntica y una fase coherente. Ya que la señal de precisión está siempre disponible, no hay necesidad de AFC, STALO o COHO, o de "recordar" el pulso anterior.

El resultado final es que los radares totalmente coherentes producen datos más exactos y están adaptados, si no son imprescindibles, para sacar provecho de algunas de las técnicas de tratamiento de señales más avanzadas que se están desarrollando actualmente. Uno de los mayores beneficios de la exactitud mejorada de los datos es la posibilidad de filtrar los ruidos del suelo de forma más eficaz. Con un radar totalmente coherente, los obstáculos estacionarios, tales como edificios, los bancos de humos, etc., muestran una medida de la velocidad prácticamente nula por lo que dichas reflexiones puedan eliminarse fácilmente.

El futuro

Una limitación importante de los sistemas de radares meteorológicos de tercera generación es la incapacidad de medir exactamente la intensidad de la lluvia y la precipitación acumulada. La solución a este problema nos conducirá a una predicción de inundaciones y a unas técnicas de gestión del agua mucho mejores.

La capacidad para identificar la posición de tipos específicos de precipitación dentro de una célula de tormenta es muy probable que nos lleve a una mejor comprensión y predicción del comportamiento de la célula de tormenta.

Gran parte de la investigación actual del radar meteorológico está encaminada a abordar ambos problemas. El objetivo es usar los datos del radar para detectar el tamaño, la forma y el estado (líquido o congelado) de los hidrometeoros. Estos datos no sólo ayudarán a identificar el tipo de precipitación, sino que, junto con los datos de reflectividad, nos ofrecen la promesa de mejorar la exactitud de las medidas de la intensidad de lluvias basadas en el radar.

Virtualmente todos los sistemas de radares meteorológicos existentes transmiten y reciben señales que están polarizadas en una dirección lineal horizontal. La investigación indica que distintas técnicas de transmisión, recepción y análisis de señales que estén polarizadas tanto vertical como horizontalmente pueden proporcionar información sobre el tamaño, forma y estado de los hidrometeoros. Los radares que utilizan estas técnicas se denominan comúnmente como radares polarimétricos o multiparámetro.

Por ejemplo, la reflectividad diferencial (ZDR) es probable que proporcione una detección fiable de granizo dentro de una célula de tormenta. La figura 1 ilustra el principio básico de funcionamiento de la ZDR.

Algunos factores operativos

Aunque los factores teóricos determinan la capacidad fundamental del sistema radar, existen una serie de factores prácticos que afectan al funcionamiento óptimo de un sistema radar en el mundo diario.

Velocidad máxima

Uno de los aspectos frecuentemente mal comprendidos del radar Doppler parece ser la relación existente entre la razón de pulso del radar (frecuencia de repetición del pulso (PRF)), la velocidad máxima y el alcance máximo. Sin embargo, a pesar de la complejidad física que está detrás de estas relaciones, el punto de partida está en el hecho de que los alcances mayores requieren un PRF muy bajo y que las velocidades más altas requieren un PRF muy alto. La medida de altas velocidades con un alcance grande es prohibitiva según los fundamentos físicos del radar de pulsos. Esto se conoce en ocasiones como el "dilema Doppler".

El diagrama de la figura 2 ofrece un modo fácil de

resolver las relaciones entre la PRF, el rango y la velocidad en un radar de banda-C funcionando a 5 600 MHz. Por ejemplo, una PRF de 1 200 pulsos por segundo permite medidas de una velocidad máxima de aproximadamente 16 m s^{-1} y proporciona un alcance máximo de 125 km.

Debe resaltarse que la longitud de onda de la señal transmitida es un factor determinante en los cálculos de PRF, velocidad y alcance. El diagrama de la figura 2 es, por lo tanto, exacta solamente para 5 600 MHz. Proporcionará estimaciones de la velocidad máxima para frecuencias cercanas a los 5 600 MHz pero no es exacta para otras frecuencias, en particular la banda-S y la banda-X.

Muchos sistemas de radares de segunda y tercera generación proporcionan "ampliación de la velocidad" a 2x, y en algunos casos a 3x e incluso a 4x utilizando algoritmos de escalonamiento de pulsos. En un sistema cuidadosamente diseñado, un algoritmo 2x duplicará con exactitud la capacidad de velocidad máxima del radar bajo una amplia gama de condiciones. Una mayor ampliación de las razones tiende a ser susceptible de errores como consecuencia de la turbulencia (espectro de gran amplitud) de la atmósfera y debe utilizarse con precaución.

Rayos

En muchas partes del mundo, los rayos son la principal causa de daños a los sistemas de radares meteorológicos. La caída de un único rayo tiene la posibilidad de destruir el transmisor y el receptor del radar, y posiblemente también el procesador de señales. Son comunes el cortocircuito destructivo y los costosos daños por la caída de rayos, tanto directamente como en las inmediaciones.

La instalación de un buen sistema de protección de rayos en un emplazamiento de radar es casi siempre una buena inversión. Los sistemas de radares de distintos fabricantes difieren en su capacidad para resistir los daños de los rayos. Un sistema que tenga una amplia protección interna contra rayos, pero que cueste más en principio, puede realmente ser más barato a lo largo de la vida del sistema debido a sus reducidos costes de reparación.

El ruido del suelo

La mayoría del ruido del suelo está causado por la potencia de la señal transmitida que "escapa" fuera de la antena, lo que se conoce como lóbulos laterales de antena (en gris oscuro en la figura 3). La energía del lóbulo lateral se expresa como una cierta cantidad de dB referenciados. En un típico centro de alimentación de la antena parabólica, la supresión debida a los lóbulos laterales es normalmente de alrededor de -25 dB por vía. Los niveles de los lóbulos laterales se expresan normalmente para la atenuación de una vía, es decir, la señal transmitida es atenuada y la reflexión recibida también es atenuada. Así que el valor total de la atenuación del camino es dos veces la de la atenuación para una vía.

La figura 4 ilustra cómo una antena de precisión con baja energía de los lóbulos laterales evita el ruido del suelo. Se ha informado de antenas con supresión de lóbulos laterales de -35 dB o más para una vía. Esto es de particular importancia en situaciones en que los ruidos son de los obstáculos móviles, tales como los vehículos o las olas de la superficie del mar. Es difícil el filtrado de los ruidos móviles; casi siempre lo más eficaz es evitarlos mediante la simple reducción de los lóbulos laterales de antena.

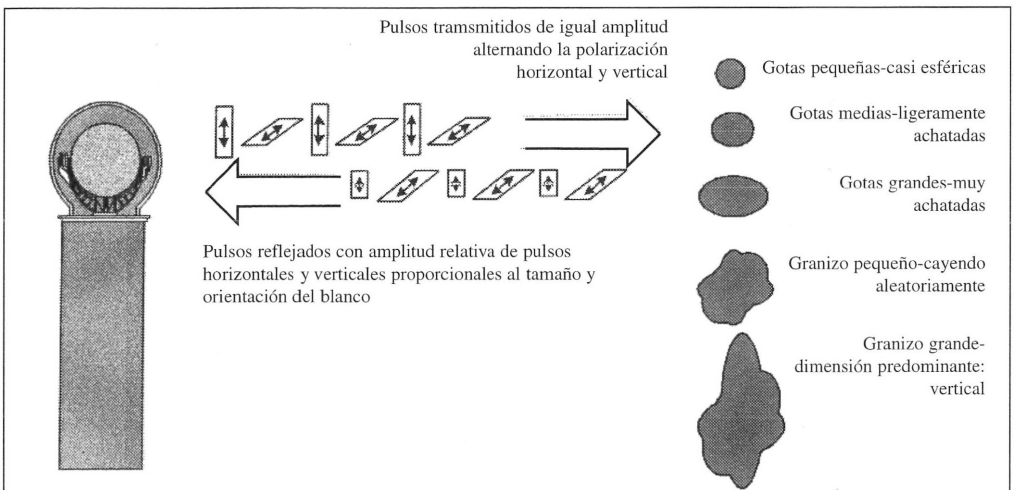


Figura 1

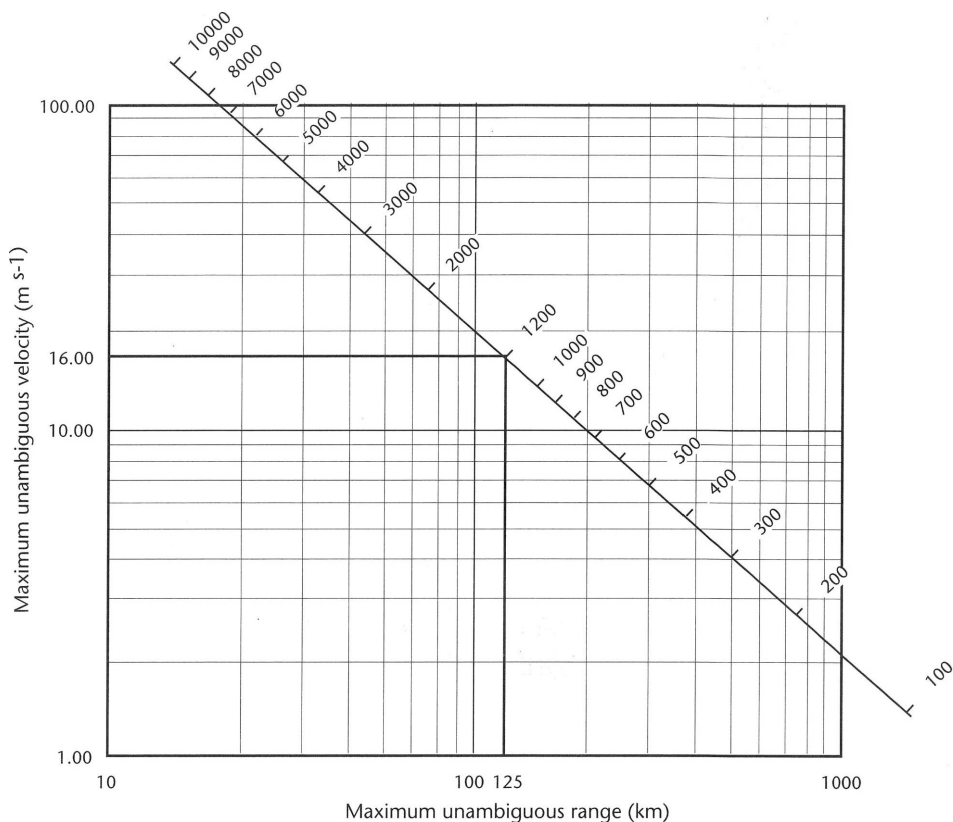


Figura 2 — Radar meteorológico Doppler de banda-C: velocidad máxima en un solo sentido frente al alcance. PRF ($f=5\ 600\ \text{MHz}$, $\lambda=5,35\ \text{cm}$)

Es posible filtrar los ruidos estacionarios del suelo. Una técnica es capturarlos y mantenerlos en un mapa de ruidos, los cuales se sustraen de los datos actuales. Otra técnica es utilizar la velocidad Doppler, y eliminar los datos con velocidad nula. El uso de esta técnica con un radar de magnetrón está limitado de forma típica a alrededor de 30 dB de supresión debido a la variación de pulso a pulso inherente a un magnetrón. Los radares totalmente coherentes pueden normalmente lograr al menos 50 dB de supresión de ruido, usando la técnica de velocidad cero.

Son particularmente difíciles los ruidos móviles, tales como los vehículos o las olas de la superficie del mar. La tecnología a elegir de forma clara cuando los ruidos móviles son un problema es la de la tercera generación de radares totalmente coherentes con una antena de precisión.

Imágenes obtenidas de los datos

Además de las imágenes básicas de reflectividad y de velocidad, muchos sistemas de radares ofrecen la

posibilidad de proporcionar productos adicionales que son deducidos de los datos básicos. Productos tales como la precipitación acumulada en un período de tiempo y el desplazamiento de las células de tormenta pueden deducirse de los datos del barrido desde una única elevación del plano indicador de posición (PPI).

Otros productos derivados requieren los datos del barrido de un volumen en 3D. Los barridos de un volumen en 3D son normalmente una serie de barridos PPI, de una revolución cada uno, hecha para sucesivos ángulos más altos de elevación de la antena. Unos pocos de los productos comunes deducidos de los barridos de un volumen en 3D son:

- altitud constante del plano indicador de posición—una representación PPI en una altitud seleccionada por el operador;
- líquido integrado verticalmente—la cantidad de líquido en una columna vertical sobre un punto del suelo situado dentro del volumen de barrido;
- secciones transversales—una rodaja vertical

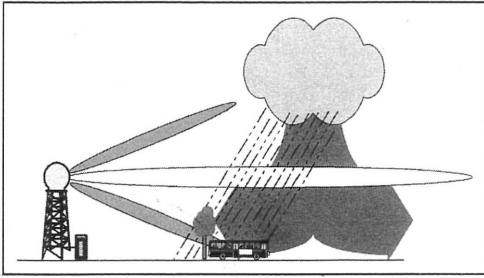


Figura 3

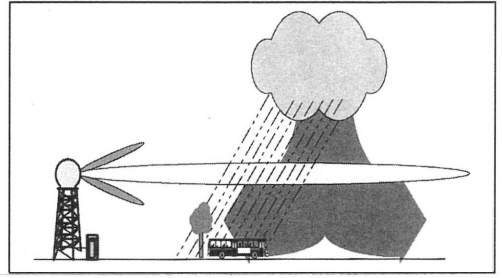


Figura 4

sobre una línea trazada entre dos puntos del suelo dentro del volumen de barrido;

- cimas de los ecos—una representación de mayor exactitud de los datos reflejados.

Algunos sistemas pueden ofrecer la posibilidad de hacer sonar una alarma automáticamente cuando un valor medido dentro de un producto excede de un límite prefijado. Además, algunos sistemas pueden programarse para que funcionen automáticamente dentro de un modo de operación predefinido cuando concurren un cierto conjunto de condiciones.

Emplazamiento

En muchos casos, hay poca posibilidad de elegir dónde situar el radar meteorológico. Se dispone de un cierto terreno, y es ahí donde el radar debe ser colocado. Incluso en este caso, es importante comprender los factores que afectan al funcionamiento del radar en relación con su emplazamiento.

Una completa discusión de estos factores escapa del alcance de este artículo; sin embargo, existen algunos principios generales que pueden ser fijados brevemente.

Para alcances muy cortos, menores de 1,6 km (1 milla), los datos de la mayoría de los sistemas de radares meteorológicos no son fiables. Esto es consecuencia del tiempo requerido para conmutar el radar de transmisor a receptor. Por lo tanto, el radar debería encontrarse alejado al menos a 1,6 km (1 milla) de cualquier zona en que la cobertura del radar presente un especial interés.

La velocidad medida por un radar Doppler es la que presenta a lo largo del eje central de haz del radar. Por consiguiente, el haz del radar debería ser paralelo a cualquier dirección en que sea de particular importancia dicha velocidad. Si, como ocurre con frecuencia, la velocidad a lo largo de la senda de vuelo en la pista de un aeropuerto es crítica, el radar debería estar colocado de modo que su haz pueda "mirar" hacia abajo toda la longitud de la pista. Por ejemplo, el radar TDWR de la Jefatura de Aviación

Federal de los EE.UU., se ha propuesto que esté situado sobre el eje de la pista, a unos 16 km (10 millas) del final de la misma.

El haz del radar llega a una mayor altitud para alcances más grandes, como consecuencia de la curvatura de la Tierra. La figura 5 muestra el tamaño y la altitud aproximada de un haz para distintas distancias desde el radar. El tiempo a baja altitud no puede ser visible para un radar con grandes alcances. Por esto, el radar debe estar suficientemente próximo a la zona de interés, para "ver" el tiempo a bajas altitudes.

Suministro ininterrumpido de energía

Los fenómenos meteorológicos intensos son la mayor de las causas de cortes de corriente. Esto significa que un radar sin un suministro ininterrumpido de energía (UPS), presenta un alto riesgo de quedar inactivo justo cuando sus productos tienen el mayor valor e interés. Además de suministrar energía al propio radar, los UPS deben también suministrarla a cualquier equipo de tratamiento y de comunicaciones para obtener los datos del radar en el lugar deseado.

Costes

Gran parte de los costes de los primeros radares de la tercera generación están asociados a los sofisticados ordenadores de tratamiento de la señal. Los avances de los últimos años en la tecnología de los PC y de las estaciones de trabajo han hecho posible tener gran potencia de procesamiento en un equipo de sobremesa por unos pocos miles de dólares de los EE.UU., lo que hace pocos años atrás habría requerido un superordenador de muchos millones de dólares. Dado que el procesamiento de la señal del radar necesita un cálculo intensivo, las grandes prestaciones de los PC y de las estaciones de trabajo han permitido importantes reducciones de los costes en los sistemas de radares sofisticados.

El coste de cualquier sistema de radar dado o de su instalación se basa obviamente en muchos factores locales. Es importante reconocer que el coste del

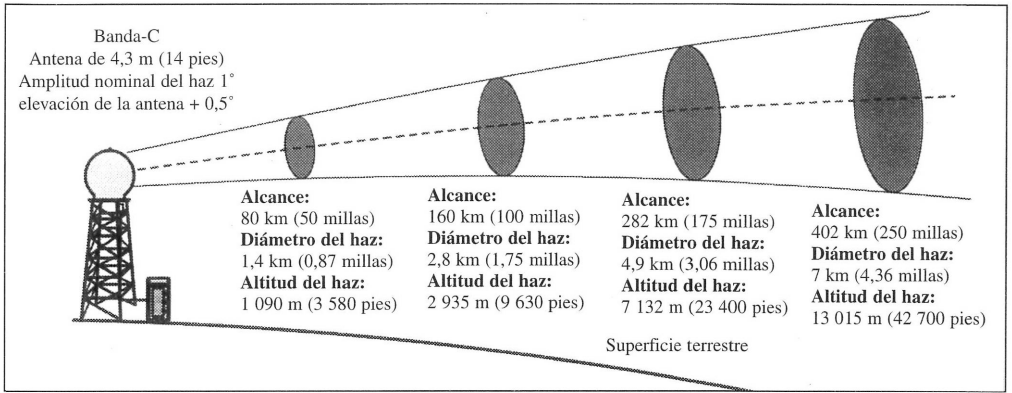


Figura 5 — Tamaño y amplitud del haz del radar frente al alcance (Numerosos autores han deducido que el haz del radar se curva hacia abajo en aproximadamente 4/3 del radio de la Tierra, debido al efecto de inclinación del haz en la atmósfera. Este análisis incluye el efecto de calcular la altitud del haz respecto al eje del mismo)

radar en sí, o de cualquier radar modernizado, es sólo una parte del coste total. Con frecuencia debe realizarse una obra civil, los operadores y los técnicos deben ser formados, deben comprarse repuestos, etc. Estos costes deberán ser incluidos en el total.

La siguiente información tiene la intención de proporcionar una guía sobre el orden de magnitud. Las estimaciones exactas sólo pueden hacerse como respuesta a los detalles específicos y los requerimientos de una situación particular en un momento determinado.

Modernización de un radar existente

La modernización de un sistema de radar ya existente puede ser una alternativa viable en situaciones en que se requiere una capacidad adicional, pero simplemente no se dispone de presupuesto para un radar nuevo. Sin embargo, no existe la magia en la modernización de un radar viejo. Tras completarla, es todavía básicamente un radar viejo con algunas características adicionales. El domo ha estado expuesto durante años al medio ambiente, los componentes mecánicos del sistema rector de la antena aún tienen años de desgastes y roturas, etc. Más pronto o más tarde (normalmente más pronto) el radar básico llega a tener un mantenimiento antieconómico y hay que reemplazarlo. Aunque un radar nuevo puede durar 20 años, la vida útil de uno modernizado está irrevocablemente ligada a la vida que le queda al radar viejo.

Ya se puede disponer de las nuevas unidades de tratamiento digital de la señal, que pueden usarse con muchos de los radares existentes. Estas unidades pueden proporcionar un sistema digital infrarrojo, un filtrado digital y funciones digitales Doppler. Cuando se utilizan conjuntamente con una estación de trabajo y programas adecuados, estas unidades son capaces

de proporcionar la verdadera operación de barrido de un volumen en 3D y el tratamiento de los datos. Dicha modernización puede costar entre 100 000 y 500 000 \$ EE.UU., dependiendo del radar implicado y de la extensión de la modernización.

Debe resaltarse que si los productos de barrido de un volumen forman parte de la modernización del sistema, la amplitud de la banda para la comunicación de los datos entre el radar y la nueva estación de trabajo también tiene que modernizarse. El barrido de un volumen está formado por múltiples barridos PPI para ángulos de elevación de la antena sucesivamente más altos. Si se tarda como mínimo dos o tres minutos para enviar cada barrido PPI a la estación de trabajo, la resolución temporal del barrido de un volumen completo es tal que es probable que los datos no sean significativos. Para tener éxito en la operación, la nueva estación de trabajo deberá estar colocada junto al radar y el procesador de señales o bien el enlace de comunicaciones de los datos con la estación de trabajo deberá ser capaz de transmitir los datos del radar en tiempo real.

Instalación de un radar nuevo

Muchos fabricantes disponen de sistemas radar de la segunda generación de fabricación reciente. El precio de un sistema básico oscila normalmente entre 500 000 y 1 500 000 \$ EE.UU. El precio se ve afectado por una serie de factores entre los que se incluye la potencia máxima del transmisor, el tamaño de la antena y si está incluida o no la capacidad de barridos de volumen.

Se dispone comercialmente de radares totalmente coherentes de tercera generación que costarán normalmente entre 600 000 y 1 800 000 \$ EE.UU., para la configuración básica. Una vez más, el precio

real está determinado en gran manera por la potencia máxima del transmisor, el tamaño de la antena y la capacidad de barridos de volumen. En muchas situaciones, un radar totalmente coherente de tercera generación con menor potencia y con amplia capacidad de pulsos, puede ofrecer un funcionamiento satisfactorio a un precio más bajo.

El tamaño de la antena es uno de los principales factores de coste. El coste de la antena de un radar, el domo, etc..., es una función exponencial de su tamaño. Duplicar el tamaño de la antena hará que supere el precio en más del doble de su valor igual que ocurre con el coste del domo y requerirá una torre más robusta para soportarlo. La razón para utilizar antenas más grandes es conseguir haces más estrechos. Lo que intenta el haz del radar es ser una

sonda larga y delgada introducida en la atmósfera. Cuanto más estrecho sea el haz mejor, pero también más caro. La relación entre el tamaño de la antena y la amplitud del haz está definida por los fundamentos físicos de las ondas electromagnéticas. Para muchos fines meteorológicos se usa normalmente un haz de amplitud de 1° , correspondiendo a una antena parabólica de 4,3 m de diámetro (14 pies), para el radar de banda-C.

Estos costes no incluyen las obras civiles necesarias, la torre, el mobiliario del edificio, etc. Una estimación completa de los costes debe incluir todas las obras civiles así como las comunicaciones de los datos necesarias para enviar los datos del radar desde su emplazamiento al centro de tratamiento y, finalmente, a los usuarios de los datos. □

NUEVOS MÉTODOS PARA AUTOMATIZAR LAS OBSERVACIONES VISUALES

Por Michel LEROY*, Dave DOCKENDORFF** y Jaan KRIJUS**

Introducción

Las medidas meteorológicas han venido haciéndose durante decenios utilizando medios electrónicos. Esto ha permitido la medición, el proceso, la grabación y la transmisión automáticos de la lectura, es decir, sin intervención de un observador. Inicialmente, las variables medidas automáticamente (por ejemplo la temperatura y la presión) eran tales que el dato medido electrónicamente no diferiría sustancialmente de las lecturas proporcionadas por un observador. A medida que la tecnología avanzaba, la automatización de las medidas en muchos países llegó a ser menos cara que el coste de emplear a un observador. Al mismo tiempo, los usuarios de los datos ganaron más experiencia y confianza en los datos medidos automáticamente. Esto condujo a una presión cada vez mayor para automatizar las medidas de, esencialmente, todas las variables meteorológicas importantes.

Sin embargo, la medición automática de las observaciones visuales ha presentado dificultades

reales. Una de las variables difíciles de medir automáticamente ha sido el tiempo presente. En el pasado, era observado por una persona que, después de una formación profesional adecuada, hacía un juicio sobre la clase e intensidad de la precipitación junto con cualquier obstrucción en la visión. La utilización de un instrumento para intentar acercarse a la actuación de un observador frente al tipo de precipitación, generalmente ofrece datos que son similares, pero no idénticos, a los suministrados por un observador. Hay, además, condiciones bajo las cuales puede fallar el instrumento para actuar con precisión. Un usuario acostumbrado a las observaciones suministradas por una persona e ignorante de las características del instrumento de medida, estará en peligro de interpretar mal el dato suministrado y, en algunas situaciones, tomar decisiones operativas erróneas.

Al mismo tiempo, los intentos de utilizar instrumentos para medir variables como la visibilidad y el tiempo presente, han conducido a la necesidad de comprender la física y a cuantificar con más precisión las variables consideradas. Los resultados de estos nuevos instrumentos no pueden compararse directamente con las observaciones humanas clásicas. Más aún, las observaciones visuales y las claves asocia-

* *Météo-France, Trappes, France*

** *Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario, Canadá*