

POSIBILIDADES DE LOS FILTROS DE KALMAN EN EL PRONÓSTICO DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y RADAR

Juan de Dios del Pino Corredera

GPV del CMT en Andalucía Occidental y Ceuta. INM

RESUMEN

Los filtros de Kalman están pensados para corregir errores sistemáticos en los modelos de predicción, por lo que requieren previamente de imágenes previstas, siendo este el principal problema de su uso en la teledetección. No obstante, en el campo de la teledetección pueden idearse esquemas de cálculo para el pronóstico de productos a corto y muy corto plazo. Para ello se recurre a la persistencia junto con el estudio del entorno de un píxel, como herramienta pronosticadora, al uso de imágenes transportadas por los modelos numéricos, o a la utilización de variables meteorológicas muy relacionadas con la con las variables medidas en la teledetección, con son la cobertura nubosa.

1. Introducción

Los filtros de Kalman han sido aplicados con bastante éxito al pronóstico local de variables observadas en superficie. Solucionan la interpolación necesaria de los modelos numéricos de predicción desde los puntos de rejilla hasta la ubicación de los observatorios meteorológicos, así como la diferencia entre las condiciones geográficas del modelo y los puntos de observación.

Se trata ahora de ver las posibilidades de este método en el pronóstico de productos de teledetección. En este sentido y a través de la elección adecuada de las ecuaciones de pronóstico de los filtros de Kalman, se pueden diseñar esquemas de cálculo para la obtención de imágenes de satélite, en sus diferentes canales y para varios alcances de predicción. También requiere dosis de imaginación la elección de la ecuación de observación, al no haber en sí ningún producto directo a partir de los modelos numéricos igual a aquel que se quiere pronosticar. Aunque se pueden acoplar a otros esquemas de obtención de imágenes previstas basados en los modelos de transferencia radiativa.

Aunque en el corto y medio plazo se deben incorporar modelos numéricos de predicción, en el muy corto plazo, a veces, es suficiente con la imagen observada en el momento actual y unas pocas del pasado inmediato. Esto permite su uso como algoritmos autónomos de cálculo en el seguimiento de estructuras meteorológicas en imágenes de satélite y radar

2. Los filtros de Kalman

En el campo de la teledetección podemos decir que un filtro de Kalman pretende estimar el error entre una imagen prevista $I_{PRE}(t)$ y su observación $I_{OBS}(t)$ en el instante de tiempo t . Esto es

$$Y(t) = I_{OBS}(t) - I_{PRE}(t) [1]$$

Pero como ya hemos mencionado con anterioridad, no suelen existir imágenes previstas, es decir, no hay valores previstos de temperatura de brillo, albedo, reflectividad, etc., por lo que la principal dificultad en la aplicación de los filtros de Kalman en la teledetección, estriba en encontrar la variable $I_{PRE}(t)$. Veremos, más adelante, como el ingenio nos puede llevar a obtener algún valor en este sentido.

Siguiendo con la idea del filtro de Kalman, el error entre el valor previsto y observado para cualquier píxel de una imagen de teledetección tiene una componente no sistemática o ruido $Y_{NS}(t)$, y otra sistemática que podrá modelizarse mediante variables meteorológicas, según la expresión [2], conocida como ecuación de observación. Siendo $Z_{PRE}(t)$ un vector cuyas componentes son variables meteorológicas o de teledetección proporcionadas por los modelos de predicción, siendo pues externas al filtro y $X(t)$ un vector cuyas componentes son los coeficientes correctores que se estiman dentro del esquema de cálculo del filtro.

$$Y(t) = Z_{PRE}(t) \cdot X(t) + Y_{NS}(t) \quad [2]$$

Los coeficientes de corrección se estiman dentro del esquema de cálculo del filtro mediante la ecuación de pronóstico de la expresión [3]. En definitiva son los coeficientes del instante presente corregidos por una expresión que depende de la diferencia entre la corrección observada $Y(t)$ y la que se había estimado por el filtro $Y(t/t-1)$ en el instante pasado $t-1$, según la expresión [3]. Los pesos $\delta(t)$, que también son estimados dentro del filtro, dependen del grado de adaptabilidad del filtro, medido mediante las varianzas de las correcciones y de los coeficiente de corrección. Su expresión se deduce según el criterio estadístico de minimizar las varianzas de los errores en las estimaciones de los coeficientes de corrección.

$$X(t/t) = X(t/t-1) + \delta(t) \cdot \{Y(t) - Y(t/t-1)\} \quad [3]$$

Esta expresión [3] es la que no permite avanzar en el tiempo dentro del filtro, de ahí que se le llame ecuación de pronóstico.

Con esto podemos estimar en el instante presente t una imagen en un instante futuro $t+1$ mediante la expresión [4],

$$I(t+1/t) = I_{PRE}(t+1) + X_1(t+1/t) Z_1(t+1) + X_2(t+1/t) Z_2(t+1) + X_3(t+1/t) Z_3(t+1) + \dots + X_N(t+1/t) Z_N(t+1) \quad [4]$$

El filtro estimará N coeficientes de corrección, siendo N el orden del filtro, y habremos de proporcionarle externamente $N-1$ variables previstas. El término X_1 engloba el ruido, que siendo sistemático, no es explicado por las variables $N-1$ variables.

3. Aplicación de los filtros al pronóstico de variables de teledetección

Determinar una expresión para la imagen prevista $I_{PRE}(t+1)$ y el conjunto de variables Z_i adecuadas es la tarea más laboriosa en la aplicación de los filtros. En este sentido, una imagen prevista puede ser, la imagen observada en el momento presente. Esta idea de utilizar la persistencia como instrumento pronosticador será adecuada si hay poca diferencia de tiempo entre una imagen y la siguiente, por lo que es un esquema más adecuado para productos proporcionados por los radares meteorológicos que tienen actualmente mayor resolución temporal. La ecuación [5] expresa esta idea. Además en ella se ha incluido como variable adicional los valores del parámetro en los puntos contiguos determinados por la expresión $I_C(t, x+\Delta x, y+\Delta y)$. La amplitud del entorno dependerá de la estimación de la velocidad de propagación de las estructuras entre una imagen y la siguiente, determinada a partir de modelos numéricos, o bien mediante un valor medio, o bien abriendo suficientemente la ventana de puntos. Siendo este último el procedimiento más adecuado pero también el más costoso en tiempo de ejecución, pudiendo superar a la llegada de la imagen real.

$$I_C(t/t+1) = I_C(t) + X_1(t+1/t) + X_2(t+1/t) I_C(t, x+\Delta x, y+\Delta y) \quad [5]$$

Al considerar la persistencia como herramienta pronosticadora no exponemos a conseguir imágenes previstas con estructuras retrasadas. Para solucionar este problema podemos incorporar salidas de modelos numéricos relacionadas con la variable de teledetección que se quiere predecir. En este sentido y para la temperatura de brillo de una imagen de satélite dentro del canal infrarrojo, una expresión para el filtro de Kalman puede ser la siguiente:

$$I_{IR}(t/t+1) = I_{IR}(t) + X_1(t+1/t) + X_2(t+1/t) T_{850}(t+1) + X_3(t+1/t) T_{500}(t+1) + X_4(t+1/t) T_{300}(t+1) \quad [6]$$

Donde se han incluido las temperaturas a varios niveles de presión, concretamente 850, 500 y 300 hPa.

Para imágenes de vapor de agua, se puede utilizar una expresión similar pero con la humedad relativa HR, a varios niveles, como contenida en la expresión [7].

$$I_{WV}(t/t+1) = I_{WV}(t) + X_1(t+1/t) + X_2(t+1/t) HR_{850}(t+1) + X_3(t+1/t) HR_{500}(t+1) + X_4(t+1/t) HR_{300}(t+1) \quad [7]$$

La cobertura nubosa total o por niveles puede incluir también como variable prevista, sobre todo para imágenes visibles e infrarrojas, como aparece en la expresión [8], donde $CVR_{SFC}(t+1)$ es la cobertura nubosa total.

$$I_C(t/t+1) = I_C(t) + X_1(t+1/t) + X_2(T+1/t) CVR_{SFC}(t+1) [8]$$

Además de la persistencia, una imagen prevista puede ser la imagen actual pero desplazada a partir de los modelos numéricos, suponiendo que cada píxel viene de uno de la imagen anterior, dependiendo éste de la velocidad prevista media por el modelo en el nivel adecuado. Esta idea se refleja en la ecuación [9], donde $I_C(t \rightarrow t+1)$ es una transformación de la imagen en el tiempo t al instante $t+1$ mediante algún modelo numérico.

$$I_C(t/t+1) = I_C(t \rightarrow t+1) + X_1(t+1/t) + X_2(T+1/t) I_C(t \rightarrow t+1) + X_3(t+1/t) I_C(t \rightarrow t+1, x+\Delta x, y+\Delta y) [9]$$

También en esta expresión se incluyen como variables pronosticadoras la propia imagen transportada y una vecindad del píxel en cuestión. Lo mismo que en la expresión [5] puede decirse de la amplitud del entorno de puntos a considerar. Sin embargo, en esta ocasión puede ser menor que en la anterior, ya que el movimiento ya está incluido en la imagen transportada.

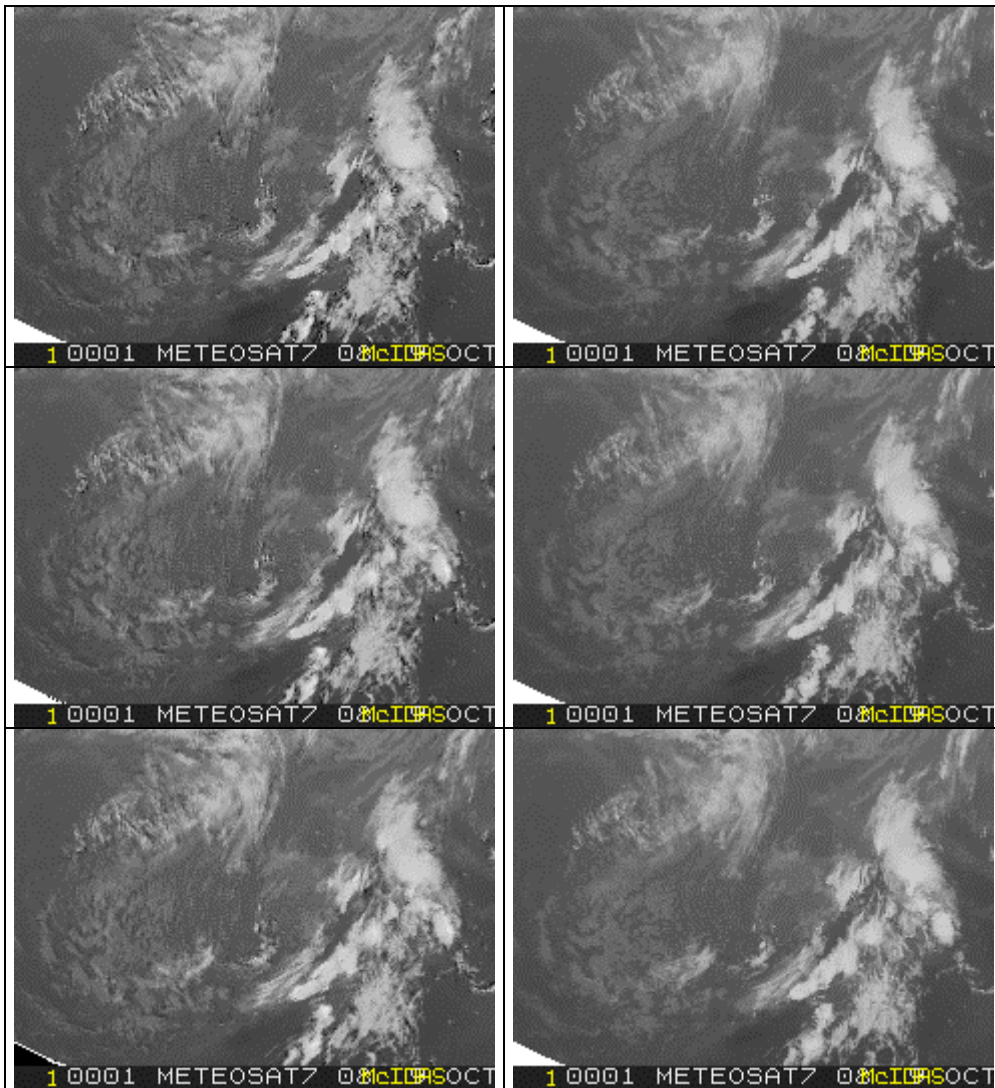


Figura 1: Imágenes de satélite METEOSAT en el canal infrarrojo previstas (izquierda) para un alcance de 30 minutos y observadas (derecha) a partir de un filtro de Kalman con el esquema de cálculo [9], basado en el uso de imágenes trasportadas por los modelos numéricos.

4. Algunos resultados de filtros de Kalman aplicados a la teledetección

Los filtros anteriores de las expresiones [5] a [9] y otros más, están siendo probados con resultados y errores muy variados. A continuación se exponen resultados del filtro [9] aplicado para el pronóstico de

imágenes METOSAT dentro de los canales infrarrojos y vapor de agua para un alcance en el pronóstico de 30 y 60 minutos, respectivamente. Estos resultados se recogen en las figuras 1 y 2, donde además de las imágenes previstas (a la izquierda), aparecen las observadas para ese mismo instante (a la derecha), con la idea de ser comparadas.

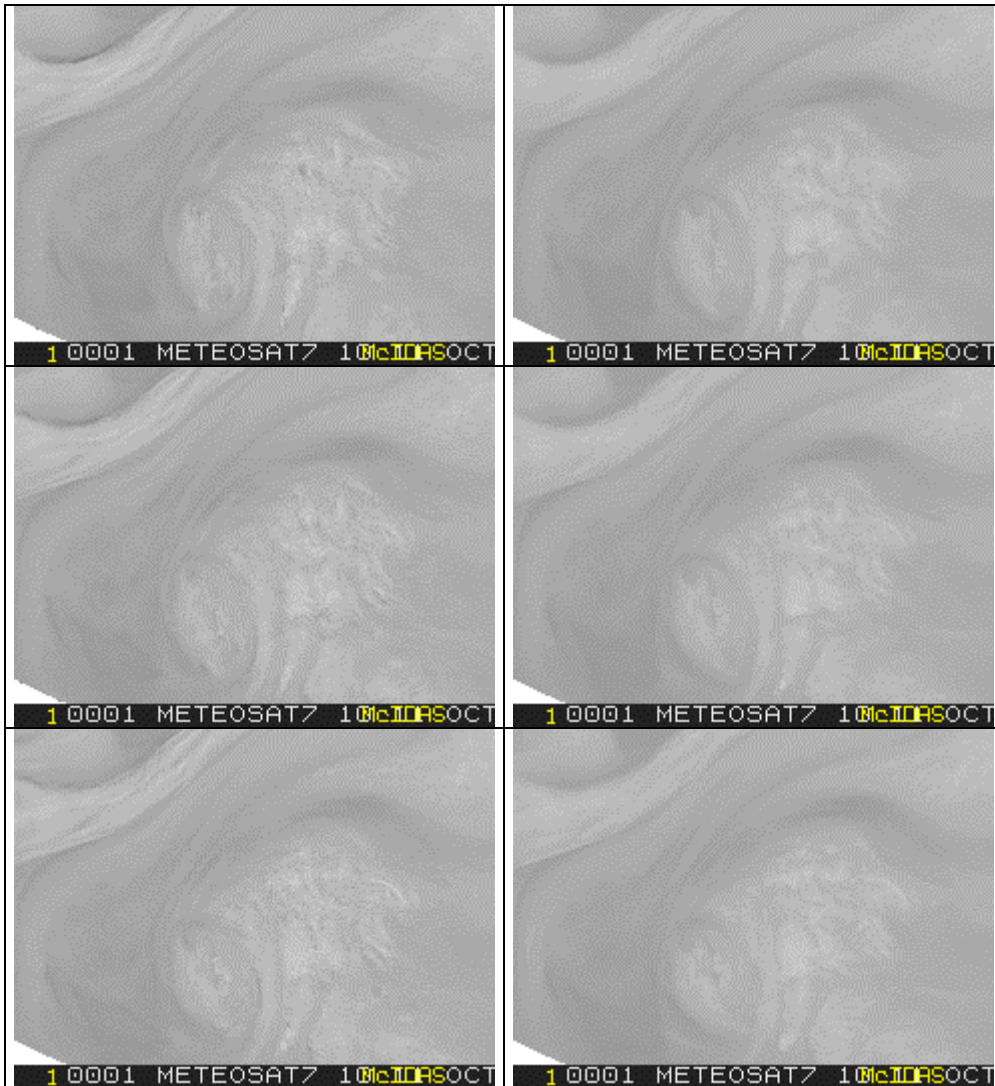


Figura 2: Imágenes de satélite METOSAT en el canal vapor de agua previstas (izquierda) para un alcance de 30 minutos y observadas (derecha) a partir de un filtro de Kalman con el esquema de cálculo [9], basado en el uso de imágenes transportadas por los modelos numéricos.

5. Conclusiones

Esquemas de cálculo con filtros de Kalman, donde solo se incluyan imágenes de satélite observadas, solo son posibles para el pronóstico de imágenes de muy alta resolución temporal, como sucede actualmente con las imágenes radar, y en un futuro con las de satélites geoestacionarios.

Los salidas de los filtros de Kalman validos para pronósticos a corto y muy corto plazo pueden ser útiles para su inclusión en otros algoritmos de calculo (seguimiento de células convectivas mediante radar, análisis de sistemas convectivos de mesoescala a partir de imágenes de satélite, etc).

Los filtros de Kalman pueden ser una buena solución para corregir los errores de las imágenes previstas o pseudoimágenes por los modelos de transferencia radiativa en el corto y muy corto plazo.

Esquemas de calculo con filtros de Kalman para el medio plazo no parecen viables.

Referencias

- Del Pino, JD, 1997 Filtro de Kalman aplicado a la predicción de temperaturas a 2 metros. Nota Técnica del CMT de Andalucía Occidental. INM.
- Del Pino, JD. 1997. Verificación del filtro de Kalman aplicado a la predicción de temperaturas a 2 metros. . Nota Técnica del CMT de Andalucía Occidental. INM
- Del Pino, JD, 1998 Adaptación del pronóstico del viento a 10 metros del modelo HIRLAM5 en el Estrecho de Gibraltar mediante un filtro de Kalman. Nota Técnica del CMT de Andalucía Occidental. INM.
- Anders O. Persson. Kalman filtering. A new approach to adaptive statistical interpretation of numerical meteorological forecasts. ECMWF Newsletter Num. 46, June 1989 p.16-20.
- Cattani D. Genève. Mai 1994. Application d'un filtre de Kalman pour adapter les températures à 2 mètres fournies par le modèle ECMWF aux stations météorologiques de la Suisse. Rapports de travail de l'Institut Suisse de météorologie.
- Cohn, S. E. y D. F. Paris 1991. The behaviour of forecast error covariances for a Kalman filter in two dimensions. Mon. Wea. Rev 119, 1757-1785.
- Kalman R. E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. Jour. of Basic Engineering (Trans. ASME series D) 82 p.35-45.