DISEÑO DE UN DETECTOR RADAR EN AMBIENTES INTERFERENTES K_DISTRIBUIDOS

J. Vidal, J. Fdez. de Muniain, A. Elías Fusté.
Grupo A.M.R., Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones.
E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona.
Universidad Politécnica de Cataluña.
Apdo. Postal 30.002, 08080 Barcelona.
Tel. (93) 401.72.29.

ABSTRACT

In this paper, the radar detection of targets embedded in K_clutter and white gaussian noise is examined. The compound K distribution model is a good model for observed echoes amplitude statistics over a wide range of conditions. It allows to work with spatial and temporal correlated models.

The paper resorts to the general theory of radar detection, and propose a processing scheme adapted to the compound K_distribution model.

INTRODUCCION:

En la detección de blancos mediante técnicas de radar es necesario caracterizar los modelos estadísticos adecuados para los tres procesos inmersos en el problema de la detección; esto es, ruido, clutter y ecos procedentes del blanco. El modelo gausiano para el ruido es válido, ya que bajo este nombre se incluirán todas las interferencias atmosféricas y térmicas propias de un detector físico trabajando en entornos reales. Sin embargo, tanto para el clutter como para los ecos del blanco, es necesario buscar otros modelos estadísticos que se ajusten más al comportamiento real observado en la práctica.

Usualmente el clutter radar se ha modelado mediante procesos gausianos en sus componentes en fase y en cuadratura, pués éstos derivan del teorema central del límite (muchos centros reflectores independientes) y dan lugar a esquemas de detección simples.

Se ha comprobado que cuando se trabaja con radares de resolución elevada o con ángulos de elevación pequeños, el comportamiento estadístico del clutter se aleja del modelo gausiano como consecuencia de que el número de centros reflectores es demasiado pequeño y la superficie explorada no es estadísticamente estacionaria.

Surgen así nuevos modelos de estudio del clutter que intentan adaptarse a lo observado experimentalmente, los cuales presentan como características comunes, funciones de densidad de

probabilidad con grandes "colas" para la envolvente y distribuciones uniformes para la fase. Algunos de los modelos más utilizados son las leyes estadísticas Weibull, Log-normal y la ley K o de Hankel. Todos ellos se caracterizan por ser procesos estocásticos invariantes esféricamente y quedan completamente caracterizados por sus medias y sus matrices de covarianzas.

La mayoría de los modelos propuestos derivan de estudios empíricos; sin embargo la distribución K se basa en un análisis teórico más detallado con la intención de relacionar la estadística de la señal detectada con propiedades geométricas y electromagnéticas de la superfície explorada.

En este trabajo se presenta uno de los detectores realizados en este contexto, referido al estudio del clutter K, adaptado a blancos gausianos con cualquier forma de su función de autocorrelación, inmersos en clutter K (función de densidad de probabilidad de Hankel para la envolvente y uniforme para la fase) y ruido térmico blanco y gausiano.

El detector implementado realiza en primer lugar una estimación de la señal proveniente del blanco utilizando un filtrado de Kalman sobre las muestras de entrada (clutter+ruido+blanco), de tal modo que, restando, o no, la estimación del blanco de las muestras de la señal, obtenemos muestras de clutter y ruido térmico bajo las dos hipótesis de trabajo. Posteriormente se procesan estos dos conjuntos de muestras mediante un predictor óptimo (en el sentido de minimizar el error cuadrático medio), no lineal (ya que el clutter no es gausiano), y adaptativo, para obtener los residuos entre las muestras de señal y las predicciones bajo las dos hipótesis. Finalmente se tratan estos residuos mediante un algoritmo de decisión basado en la regla de máxima verosimiltud.

GENERACION DE LA ESTADISTICA K

El clutter modelado como un proceso de banda estrecha lo expresamos:

$$c(t) = c_i(t)\cos w_o t \; - \; c_q(t)\sin w_o t \; = \; Re\left\{\tilde{c}(t)\; e^{jw_o t}\right\}$$

$$\tilde{c}(t) = c_i(t) \; + jc_q(t) \; = \; R(t)e^{j\beta(t)}$$

Para poder realizar una detección coherente necesitamos la caracterización del módulo R(t) y de la fase $\beta(t)$. Esta caracterización tiene que estar de acuerdo con el proceso físico que se pretende simular. Según esto será necesario que:

1) Poder fijar la autocorrelación de las componentes en fase y cuadratura, así como la correlación cruzada entre ellas de acuerdo con algún parámetro físico.

2) La PDF (Función de Densidad de Probabilidad) de primer orden que obtengamos con el modelo ha de seguir los datos experimentales del clutter que pretendemos modelar y tiene que reducirse a una PDF Rayleigh como un caso particular.

3) Invarianza de las estadísticas de las componentes en fase y cuadratura ante una rotación de los ejes de referencia (esto es, frente a cambios de fase del oscilador local).

4) Distribución uniforme de la fase en $(0,2\pi)$.

5) Igualdad de las funciones marginales de densidad de probabilidad de las dos componentes, en fase y cuadratura.

Se consiguen todas estas características si modelamos el clutter como un SIRP (Proceso Estocástico

Invariante Esféricamente). Para ello la PDF conjunta ha de poder expresarse como una forma cuadrática definida no negativa de la forma:

$$f_{c_i,c_q}(x,y) = |M|^{-\frac{1}{2}} (2\pi)^{-1} h_2\left[(x-m_x, y-m_y)\cdot M \cdot \begin{pmatrix} x-m_x \\ y-m_y \end{pmatrix}\right]$$

donde:

M: Matriz de Covarianzas conjunta.
$h_2(.)$: Función perteneciente a la clase de funciones admisibles.
m_x y m_y: Valores medios.

Funciones Admisibles: Son aquellas que presentan la estructura:

$$h_n(q) = \int_0^{\infty} s^{-n} e^{\left(-\frac{1}{2}\frac{q}{s^2}\right)} f(s)\, ds$$

donde:

$f(s)$: es cualquier función de densidad de probabilidad válida; representa la PDF característica del SIRP, (CPDF).
n: es el orden de la PDF. En nuestro problema bidimensional, n=2.

Aplicando este planteamiento al clutter real, tenemos:

1) Las medias de las distribuciones marginales son nulas.
2) La matriz de Covarianzas conjunta es: $M = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{bmatrix}$.

Con lo que se obtiene la PDF conjunta de las componentes:

$$f_{c_i,c_q}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} h_2\left[\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right]$$

y la PDF conjunta de la envolvente y de la fase:

$$f_{R,\beta} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} r\, h_2\left[\frac{r^2}{\sigma^2}\right]$$

En esta última expresión se observa la indepenencia entre el módulo y la fase, así como la distribución uniforme de esta última.

En el caso de tener una distribución K en la envolvente $f_R(r)$, la CPDF necesaria seguirá un comportamiento del tipo Chi_generalizada:

$$f(s) = \frac{2\lambda^{\nu}}{\Gamma(\nu)} s^{2\nu-1} e^{-\lambda s^2} u(s)$$

donde:

λ: parámetro de escala.
ν: parámetro de forma.
$\Gamma(.)$: función Gamma.

dando lugar a la expresión de la función de densidad de probabilidad de la ley K o de Hankel. Esta

ley depende de los parámetros c y ν, que están diréctamente relacionados con los parámetros de escala y de forma de la ley Chi:

$$f_R(r) = \frac{2c}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{cr}{2}\right)^{\nu} K_{\nu-1}(cr)\, u(r)$$

INTERPRETACION FISICA DE LA ESTADISTICA K:

Al trabajar con radares de resolución elevada y ángulos de elevación pequeños puede entenderse el clutter obtenido como la superposición de dos componentes:

1) Un valor medio local con un periodo de variación temporal lento, que dependerá de las características geométricas de la célula de resolución que se trate. Un caso límite consiste en tener un valor medio local constante, lo cual nos derivará en un clutter modelado según la ley Rayleigh. Este valor medio seguirá un comportamiento estadístico según la ley Chi en el caso de clutter K_distribuído.

2) Un valor variante, debido a múltiples centros reflectores independientes, el cual seguirá un comportamiento tipo Rayleigh. El valor medio de esta componente vendrá determinado por el valor medio local 1). Esta componente presentará unas variaciones rápidas comparadas con las de la otra componente

En definitiva, el modelo teórico del apartado anterior aplicado a la ley K, consistente en un SIRP generado mediante una función de densidad de probabilidad característica que sigue un comportamiento estadístico según la ley Chi, es equivalente al modelo real observado en radares de alta resolución formado por la superposición de las dos componentes descritas en este apartado.

DETECTOR COHERENTE EN CLUTTER K

Cuando alguno de los procesos implicados en la detección en un sistema radar presenta características de correlación temporal (generalmente modeladas mediante sistema AR), el procedimiento normal consiste en la incorporación a la cadena de detección de filtros blanqueadores, *whitening*. Si además los procesos no tienen estadísticas gausianas, será necesario previamente realizar (en los modelos que lo permitan) unas transformaciones sobre los procesos que impliquen un cambio para pasar al dominio gausiano, *gaussianing*. A todo esto será necesario dotarle de características adaptativas como consecuencia de la no estacionariedad de los procesos debidos al clutter y a los ecos procedentes de blancos.

Una vez realizados estos procesados sobre las muestras de entrada, el esquema de detección habitualmente considerado es el basado en la evaluación recursiva del LLR (Logaritmo del Ratio de Máxima Verosimilitud), seguido de la comparación con un umbral adecuado.

El eco radar recibido, $z(k)$, obedecerá a dos posibles expresiones, dando lugar a las dos hipótesis de trabajo:

- $H_0 : z(k) = d(k) + n(k)$. No existe blanco en los ecos de entrada.
- $H_1 : z(k) = s(k) + d(k) + n(k)$. Existe blanco inmerso en los ecos de entrada.

Las dos consideraciones principales en este planteamiento son, primero, que se dispone de las simulaciones teóricas de las componentes en fase y en cuadratura en banda base de todos los procesos que forman el eco, y, segundo, que los procesos procedentes del blanco, s(k), y del clutter, d(k), pueden tener PDF's no gausianas en sus componentes y unas ciertas funciones de autocorrelación temporal, que vendrán

determinadas por sus matrices de covarianzas.

Para decidir, dado un cierto conjunto de ecos, z(k), en cuál de las dos hipótesis de trabajo nos encontramos, hay que recurrir al cálculo de la LLR:

$$LLR(k) = \ln\left[\frac{P(z^k/H_1)}{P(z^k/H_0)}\right] \underset{>}{\overset{<}{}} T$$

en donde, en función de que la comparación entre el cociente de las probabilidades de tener la secuencia de ecos z^k bajo la hipótesis H_1 y la probabilidad de tenerla en la hipótesis H_0 sea mayor ó menor que un cierto umbral, T, se decidirá por la existencia, o no, de blanco en los ecos

El cálculo de la LLR se realiza en el detector mediante la estimación de los residuos que resultan al comparar las predicciones en las dos hipótesis con las muestras de ecos que se obtienen a la entrada del detector.

Para la obtención de estos residuos de predicción en el canal H_1 (hipótesis de la existencia de blanco), es necesario realizar previamente un extracción de la señal del blanco que se supone existe en los ecos de entrada. Esto implica la necesidad de tener herramientas de estimación de la señal procedente del blanco, la cual puede tener estadística no gausiana y un comportamiento no estacionario, en un problema general. Como solución se ha adoptado un estimador de blanco basado en filtros de Kalman, modificados mediante la inclusión de estimadores de los parámetros necesarios para el filtro, lo cual nos ha llevado a una implementación adaptativa de dicho filtro. Estos estimadores de parámetros del filtro obtendrán estimaciones de la matriz de correlación de la señal del blanco y de las potencias de los ruidos que, en el filtrado de Kalman, modelan los errores de medida y del modelo.

REFERENCIAS

[1] Radar detection prediction in sea clutter using the compound K_distribution model.
S. Watts. I.E.E.E. Proceedings. Vol. 132. N° 7. December 1985.

[2] Characterisation of radar clutter as a spherically invariant random process.
E. Conte, M. Longo. IEEE Proc. Vol. 134. N° 2. April 1987.

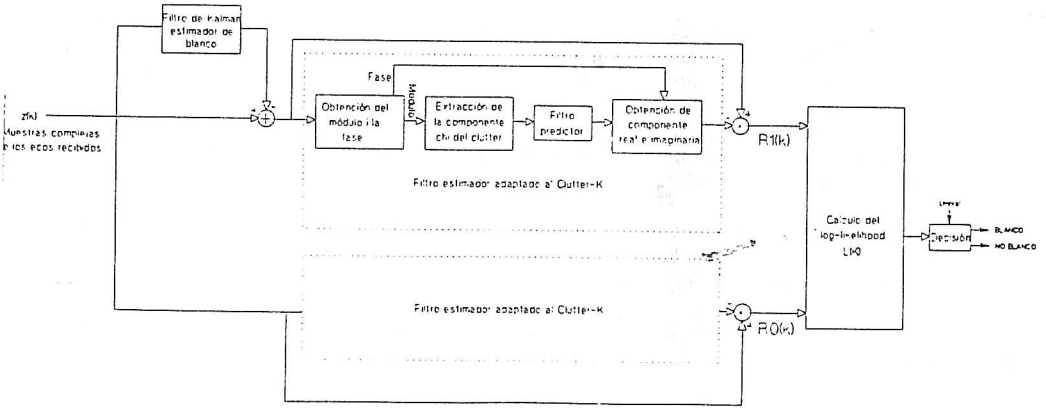

FIGURA: Diagrama de bloques del detector propuesto para la detección de blancos gausianos con cualquier forma en su función de autocorrelación inmersos en clutter K_distribuido coherente y correlado y en ruido térmico gausiano y blanco.
El filtro estimador adaptado al clutter, en las dos hipótesis, es no lineal y tiene una estructura adaptativa.