

Detección de Transmisores primarios vía Cooperación y memoria en Cognitive Radio

Antonio Betrán Martínez

New Jersey Institute of Technology – Universitat Politècnica de Catalunya

Muchas gracias a Osvaldo Simeone por introducirme en este mundo, a mis padres por apoyarme y en especial a Rocío por soportar tan largo viaje.

Contenido

I. Contexto de Cognitive Radio.....4

I.1- Introducción

I.2- Historia

I.3- Entorno y objetivos

I.3.1- Objetivos

I.3.2- Geografía y protocolo de transmisión inicial

I.3.3- Sistema de medida

II. Herramientas aplicables propuestas.....10

II.1- Diversidad cooperativa

II.1.1 Ambiente multiusuario

II.1.2- Concepto de diversidad cooperativa

II.1.3 Aplicación a Cognitive Radio

II.2- Algoritmos de detección de cambios bruscos

II.2.1- Concepto de “change detection” (CD)

II.2.2- Algoritmo GMA (Geometric Moving Average)

II.2.3- Algoritmo CUSUM (Cumulative Sum)

III. Simulación y análisis.....26

III.1- Sistema cooperativo

III.2- Memoria aplicada

III.3- Sistema completo

III.3.1- Análisis conjunto

III.3.2- Sistema selectivo

IV. Conclusiones.....41

V. Bibliografía consultada.....43

I.

**Contexto de Cognitive
Radio**

I. Contexto de Cognitive Radio

I.1- Introducción

Vivimos en un mundo basado en los recursos y en su gestión. Ciertos recursos son catalogados como vitales, como por ejemplo, el agua, o el petróleo; evocando a un surgir de alternativas para o bien optimizar su uso, o encontrar un recurso sustitutivo.

El espectro radioeléctrico es un recurso natural, gestionado por los gobiernos para diferentes ámbitos según las necesidades. Ciertos fragmentos de ancho de banda son usados para transmisiones públicas, otros para la televisión e incluso para el ejército, con lo que hay diferentes tipos de transmisiones a diferentes niveles de urgencia.

Entidades reguladoras en varios países publicaron una serie de informes en los que se evidenciaba la ineficiencia en cuanto al uso del espectro. En concreto, en Noviembre del 2002, la *Federal Communications Commission* (FCC) publicó un informe redactado por el *Spectrum-Policy Task Force* (SPTF) tratando de mejorar el manejo de este preciado recurso.

Por ejemplo, las bandas de redes celulares están sobrecargadas en la mayoría de partes del mundo, mientras que bandas como la de radioaficionados o las de frecuencias de *paging* muestran un evidente desuso. Los estudios independientes en dichos países confirman que el uso de dichas bandas depende mayoritariamente del lugar y el horario. De todos modos, la reserva de espectro fija, previene que usuarios sin licencia interfieran en transmisiones de raro uso (como transmisiones de emergencia, o del ejército), relegando esas bandas a una eficiencia en uso baja o nula. En la Fig.1 podemos ver un ejemplo de estudio en un área metropolitana extensa:

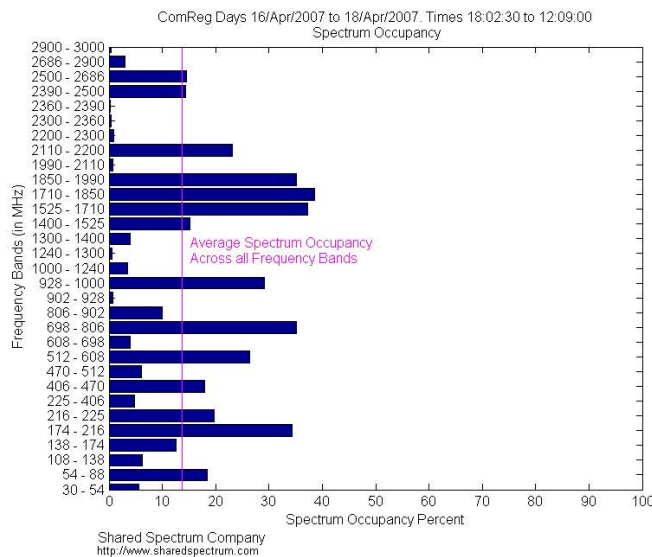


Fig 1. Estudio de eficiencia en uso de espectro.

Bajo esta consigna nace *Cognitive Radio*, buscando la convivencia entre usuarios sin licencia y usuarios registrados dentro de un mismo espectro de transmisión-recepción.

I.2- Historia

A diferencia de la radio convencional, la historia de la cual nos lleva al trabajo pionero de Guglielmo Marconi en diciembre de 1901, el desarrollo de *Cognitive Radio* esta todavía en un estadio de carácter conceptual. Aun así, si miramos al futuro, vemos como dicho concepto tiene el potencial de marcar una diferencia significativa en el camino de conseguir un acceso al espectro radioeléctrico con utilización de espectro mejorada como objetivo primario.

La idea de *Cognitive Radio* fue presentada por *J. Mitola III* y *G. Maguire Jr.* por primera vez y fue una primera aproximación a las comunicaciones inalámbricas que Mitola describió posteriormente como:

“El punto en el cual los Asistentes Digitales Personales (PDAs) y las redes relacionadas son en términos computacionales lo suficientemente inteligentes con respecto a los recursos de radio y las correspondientes comunicaciones de ordenador a ordenador como para detectar las necesidades de comunicación del usuario como una función del contexto de uso y proporcionar los recursos de radio y servicios inalámbricos más adecuados a sus necesidades”

Todo ello fue pensado como una idea dentro de un entorno de *software defined radio (SDR)* y con todo lo que ello conlleva: una caja negra inalámbrica completamente reconfigurable que automáticamente cambia sus variables de comunicación en respuesta a la situación de la red y las peticiones de los usuarios.

En concreto, Mitola publicó su primer artículo sobre el tema en 1999 donde describía como *Cognitive Radio* podía mejorar la flexibilidad de los servicios inalámbricos personales a través de un lenguaje llamado *radio knowledge representation language (RKRL)*. La idea del RKRL fue expandida posteriormente en la tesis doctoral de Mitola, que fue presentada en el Royal Institute of Technology, Suecia, en Mayo del 2000. Dicha tesis presenta *Cognitive Radio* como un entorno multidisciplinario excitante.

Como comentábamos antes, la FCC publicó un informe en 2002 el cual apuntaba a cambios en la tecnología y el impacto profundo que dichos cambios podían representar en la política de espectro vigente. Este informe marcó el inicio de un Workshop basados en *Cognitive Radio* llevado a cabo en Washington DC en Mayo del 2003 y dicho Workshop dio paso a una conferencia de *Cognitive Radio* en Las Vegas en Marzo del 2004.

A día de hoy hay muchas líneas de trabajo abiertas sobre el tema y a distintos niveles de protocolo de comunicación, la mayor parte del trabajo se centra a nivel de red y enlace aunque todavía hay algunos puntos a mejorar a nivel físico como se pretende ilustrar en este trabajo.

I.3- Entorno y objetivos

I.3.1- Objetivos

En este trabajo se pretende analizar una sección de la capa física de *Cognitive Radio* (de aquí en adelante CR) llamada *spectrum leasing*, que trata de mejorar la eficiencia compartiendo espectro entre usuarios primarios (con licencia) y secundarios (sin licencia).

El compartir frecuencia en un sistema jerárquico evoca a una preferencia en los usuarios primarios sobre los secundarios, eso significa que si el usuario primario necesita usar el espectro, cualquier tipo de actividad de usuarios secundarios debe detenerse y dejar paso a la actividad del primario.

Este documento se centra en aplicar dos herramientas provenientes de ambientes completamente distantes para mejorar la detección de actividad primaria por parte de los usuarios secundarios, en concreto, para acelerar dicha detección.

La primera herramienta proviene de un ambiente multiusuario en general y es conocida como diversidad cooperativa, la ayuda entre usuarios para transmitir, puede aprovecharse para la detección.

La segunda herramienta no es tan conocida, proviene de un entorno matemático multidisciplinario y se basa en la aplicación de algoritmos de detección de cambios (*Change Detection*), un concepto joven basado en la idea de *Análisis Secuencial* de Abraham Wald (1973) que explicaremos de manera muy delicada y mostraremos sus efectos a través de dos algoritmos distintos.

En la parte final trabajaremos con el sistema combinado y analizaremos sus efectos en distintas condiciones con el fin de testear la robustez de dicho sistema.

I.3.2- Geografía y protocolo de transmisión inicial

Durante todos los análisis nos basaremos en un ambiente con un usuario primario que comenzará a transmitir en presencia de dos usuarios secundarios hacia una misma estación base como en la figura:

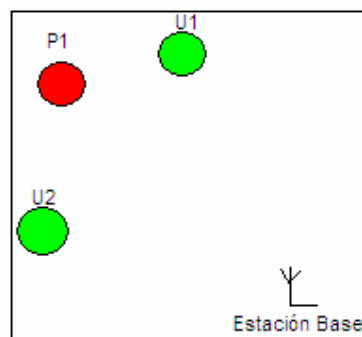


Fig 2. Entorno de análisis.

Para simplificar el sistema, el protocolo de acceso a la estación base por parte de los usuarios será un multiplexado en tiempo (TDMA), cuando un usuario primario transmita a la estación base, dicho usuario ocupará el canal hasta que termine de transmitir.

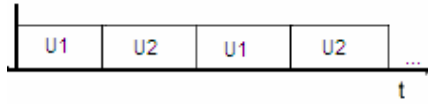


Fig 3. Acceso por turnos a la estación base.

I.3.3- Sistema de medida

Para mostrar la evolución del sistema, trabajaremos bajo un entorno de simulación MATLAB donde reproduciremos los movimientos del sistema mediante experimento de *Montecarlo*, donde llevaremos a cabo sucesivas realizaciones y promediaremos el proceso. El modelo de simulación se basa en medir el tiempo que tardamos en detectar una actividad primaria verdadera, y con las mismas condiciones, cuanto tardamos en obtener una falsa alarma. El gráfico tipo se llama *Operation Chart* (OC) y dibuja el retardo en detección en función del tiempo medio entre falsas alarmas, podemos ver un ejemplo de ello en la siguiente figura:

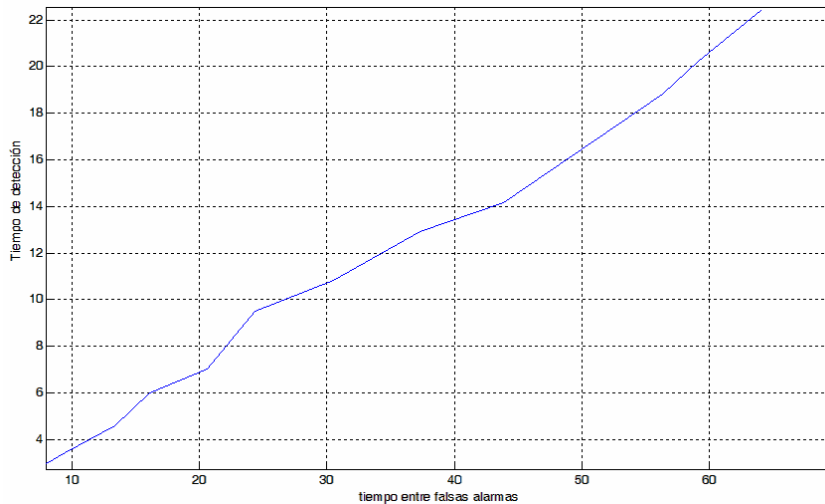


Fig 4. Ejemplo de carta de operación del sistema.

Esencialmente, el tiempo entre falsas alarmas es un valor inversamente proporcional al umbral interpuesto en el sistema de detección, y el tiempo de detección es la medida que pretendemos observar y reducir. Dicha reducción implicará una mejora en calidad de nuestro sistema y respaldará la viabilidad de ambientes jerárquicos en sistemas de comunicaciones radio multiusuario.

Así pues la simulación se basará en los dos usuarios accediendo a la estación base por turnos y en el inicio de la simulación el primario estará transmitiendo, así

mediremos desde el inicio y pararemos cuando el secundario detecte. Para simplificar dicha medida, las unidades a utilizar serán ranuras temporales (*time slots*), de este modo contaremos cuantos *slots* tarda el usuario X en detectar y parar su actividad.

II.

Herramientas aplicables propuestas

II. Herramientas aplicables propuestas

En este apartado se presentan dos herramientas, una conocida en comunidades desarrolladoras de ambientes multiusuario y otra basada en la matemática estadística de la segunda mitad del siglo XX.

II.1- Diversidad cooperativa

II.1.1 Ambiente multiusuario

La primera herramienta a presentar, trata sobre el trabajo en equipo entre usuarios secundarios. Un típico ambiente multiusuario podría describirse como la siguiente figura:

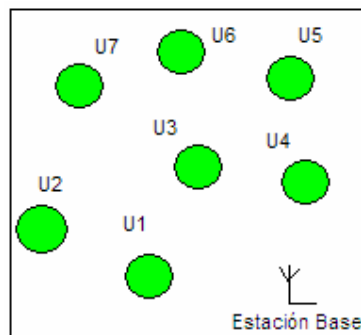


Fig 5. Ambiente radio multiusuario.

En un sistema como el que observamos, con el fin de organizar el acceso a la estación base, se podría aplicar algún tipo de diversidad en frecuencia (FDMA), asignar una banda a cada usuario, pero iría en contra de la idea de aumentar la utilización de las bandas. La comunicación sería perfecta cuando los usuarios quisieran usar la banda, pero dicha banda sería usada sólo por un usuario y con una asiduidad limitada al acceso que dicho usuario tuviera por costumbre.

Para no usar n frecuencias, cambiamos a un esquema mono-banda pero con diversidad en tiempo (TDMA). Un acceso por turnos por parte de los usuarios a la estación base nos daría una comunicación más lenta (baja la calidad de servicio). Podría ser del tipo:

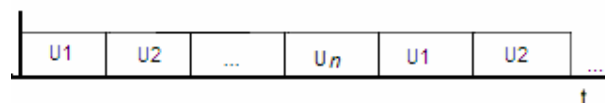


Fig 6. Sistema de acceso TDMA en ambiente multiusuario

En esta figura vemos el acceso en *slots* de cada usuario por orden y cuando llegamos al *n*ésimo, volvemos a tener el acceso del primero. Vemos que es un acceso justo, ninguno tiene prioridad o ventaja sobre el resto.

II.1.2 Concepto de diversidad cooperativa

La diversidad cooperativa surge de la idea de combatir el ruido en un ambiente multiusuario como el mencionado. En el sistema anterior, la señal transmitida por cada uno de los usuarios en su respectivo *slot* puede modelarse del siguiente modo:

$$y_1 = h_1 x_1 + n_1 \quad (eq1)$$

Donde h es el coeficiente de canal, x es la señal útil y n es ruido Blanco Gaussiano aditivo (AWGN) donde cada una de las realizaciones de dicho ruido, es decir cada una de las lecturas instantáneas de la señal de ruido, en distintos momentos de tiempo y tomada en distintos lugares, son completamente independientes. Por lo tanto, un mismo mensaje enmascarado por dos realizaciones de ruido diferentes es más fácil de decodificar ya que los ruidos son estadísticamente independientes mientras que la señal útil no. Dado esta ventaja que no debemos desaprovechar surge la idea de redistribuir el acceso mediante TDMA del siguiente modo:

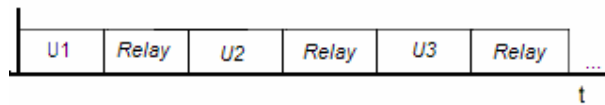


Fig 7. Sistema de acceso TDMA con diversidad cooperativa

De este modo (dividimos los *slots* en dos partes) en la primera mitad de *slot* el usuario 1 ($U1$) transmite su mensaje a la estación base mientras el resto de usuarios escuchan, en la segunda mitad de *slot* el resto de usuarios retransmiten el mensaje de $U1$ hacia la estación base. En ese momento, la estación descifra el mensaje de una manera más óptima ya que tiene muchas contribuciones de un mismo mensaje con realizaciones de ruido estadísticamente independientes.

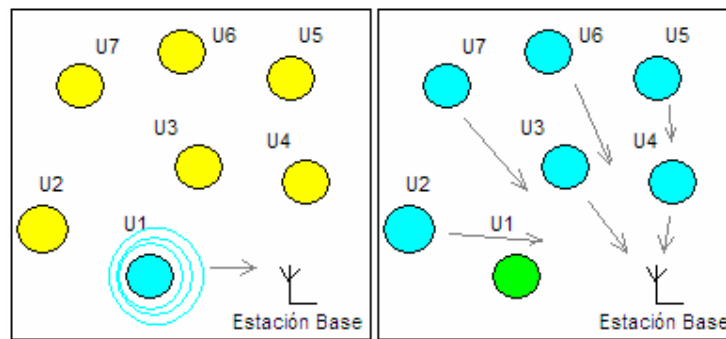


Fig 8. Sistema de acceso TDMA con diversidad cooperativa

En la figura 8 vemos el proceso de un *slot* completo, la primera mitad de transmisión y la segunda mitad de repetición del mensaje por parte del resto de usuarios. La estación base mide la media de las contribuciones (por ejemplo) y el ruido al ser un canal AWGN tiene media nula, con lo que tenemos una lectura de la señal útil más limpia (mejoramos la calidad del sistema).

II.1.3 Aplicación a Cognitive Radio

Hasta ahora hemos visto qué es la diversidad cooperativa y porqué se aplica a ambientes multiusuario (cual es su beneficio) pero es momento de ver en qué nos puede mejorar en un ambiente jerárquico como el que presentamos en la introducción.

Primeramente reduciremos nuestro problema, por simplicidad, a dos usuarios secundarios (sin licencia) y un usuario primario (registrado o con licencia) que transmiten a una misma estación base.

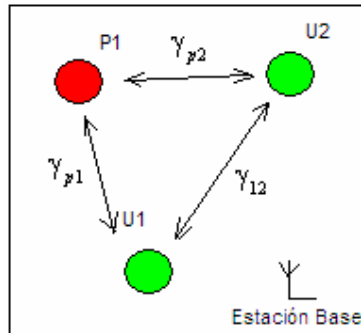


Fig 9. Sistema jerárquico a analizar

A partir de ahora trabajaremos sobre este esquema y siempre nos referiremos a él en todos nuestros análisis, dicha situación puede extenderse a cualquier número de usuarios.

Si reducimos ahora el sistema TDMA con diversidad cooperativa a esta nueva situación vemos que la división en tiempo se da del siguiente modo:

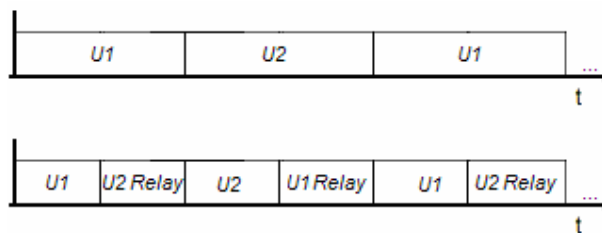


Fig 10. Acceso en tiempo. (Arriba) sin diversidad cooperativa, (abajo) equivalente con diversidad.

Bajo este modelo, analizamos como podemos favorecer la detección de actividad en transmisión del usuario primario por parte de los secundarios. Vamos a suponer que desde $t=0$ el usuario primario está transmitiendo a la estación base. Así pues, en la primera mitad de *slot* tenemos como $U1$ y P transmiten a la estación base mientras $U2$ escucha el espectro:

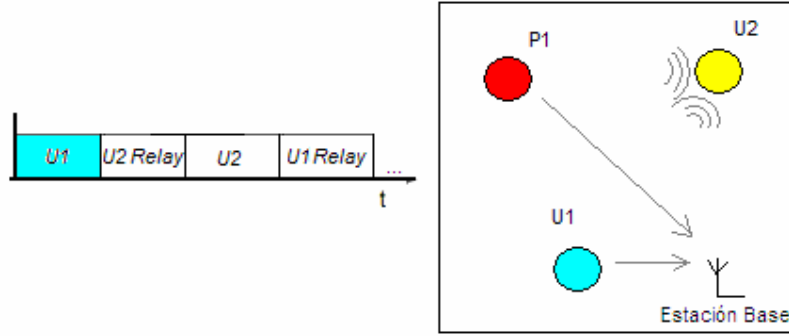


Fig 11. Primera mitad de slot de transmisión de U1.

En esta primera parte, la señal recibida en U2 es del tipo:

$$\begin{aligned} y_{21r} &= \gamma_{12} x_1 + n_1 + \gamma_{p2} p + n_p \\ y_{21r} &= \gamma_{12} x + \gamma_{p2} p + n \end{aligned} \quad (eq2)$$

Donde vemos como tenemos una contribución de señal útil del primario, otra del secundario U1 y sus respectivos ruidos asociados. Los coeficientes de canal los tenemos representados por γ_{xy} que es la ganancia (o atenuación) del canal entre el usuario x y el usuario y . Vamos a suponer que el canal es estrictamente recíproco y aceptaremos esta aproximación:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} \quad (eq3)$$

En la segunda mitad del primer slot tenemos la siguiente situación:

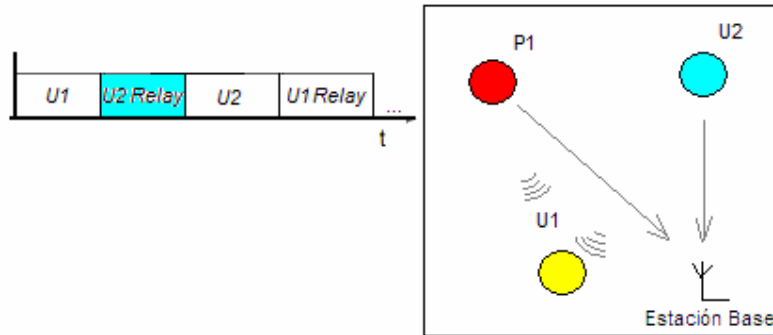


Fig 12. Segunda mitad de slot de transmisión de U1.

Ahora el que escucha es el usuario U1, mientras U2 reenvía lo que ha escuchado a la estación base, recibiendo una señal de este tipo:

$$y_{12r} = \gamma_{p1} p + n_p + \gamma_{21} y_{21r} \quad (eq4)$$

Y usando la expresión de eq2, obtenemos:

$$y_{12r} = \gamma_{p1} p + n_p + \gamma_{21} (\gamma_{12} x + \gamma_{p2} p + n) \quad (eq5)$$

Y si ahora aplicamos la equivalencia de eq3 y agrupamos:

$$y_{12r} = (\gamma_{p1} + \gamma_{12} \gamma_{p2}) p + \gamma_{12}^2 x + (\gamma_{12} + 1) n \quad (eq6)$$

Donde se observan claramente las 2 contribuciones de la señal transmitida por parte del primario, facilitando en este caso la detección por parte del usuario $U1$.

En el siguiente *slot* de transmisión (el perteneciente al usuario $U2$) tendríamos dos mitades simétricas a las dos explicadas, en las que el usuario $U2$ recibiría las dos contribuciones de P en detección (segunda mitad de *slot*) y la estación base recibiría su mensaje.

Con este esquema vemos como la detección se mejora sustancialmente y depende exclusivamente de los coeficientes del canal, que pueden ser compensados con la potencia transmitida por parte de los usuarios. Evidentemente, la señal del primario puede ser de alta potencia, debido a su exclusividad y su poca actividad. Un ejemplo de dicho sistema podría ser que el usuario primario (P) fuera la alarma de incendios de una zona industrial mientras que los usuarios secundarios ($U1$ y $U2$) podrían ser teléfonos móviles.

En cualquier caso, si no usáramos diversidad cooperativa, la señal en detección sería la única contribución de lectura directa por parte de los usuarios secundarios con lo que cada *slot* se detectaría la misma contribución de señal útil del primario mezclada con un nivel de ruido $AWGN$. En el caso de simple detector de energía como umbral de detección, la casuística de detección sería el mismo modelo Gaussiano que sigue un proceso $AWGN$.

Usando la diversidad cooperativa y el acceso por turnos que provoca cada mitad de *slot* hace que ambos usuarios puedan detectar en un mismo *slot* y que en concreto, las mitades de *slot* dedicadas a replicar lo escuchado (*relay*) nos aportan ventaja en detección.

II.2- Algoritmos de detección de cambios bruscos

Uno de los puntos fuertes en sistemas basados en calidad o entornos sensoriales en los que una decisión debe ser tomada después de un cambio en el medio, es la velocidad en la que se detecta dicho cambio.

La herramienta que presentamos a continuación es tan versátil que se puede aplicar a infinidad de medios, como por ejemplo la bolsa de divisas, la detección de un terremoto, la detección de pérdida de calidad en una pieza de una cadena de montaje, etc. Nuestro objetivo es revisar algunos conceptos básicos y mostrar un par de modelos aplicados en nuestro entorno.

Nuestro objetivo en este apartado es ir más allá del simple detector de energía en los usuarios secundarios y aligerar con un mínimo de certeza, la detección de actividad primaria en el medio.

II.2.1- Concepto de “change detection” (CD)

En el mundo de la matemática existe un apartado, con breve historia pero muy intensa en los últimos cien años que habla sobre un análisis continuo (monitorización) de variables trabajando con hipótesis de valores.

El entorno matemático de trabajo se centra en la detección de cambios bruscos y las herramientas aplicadas a esas detecciones se llaman *Change Detection Algorithms*. Los análisis en dicho entorno de trabajo pueden clasificarse en tres ambientes, siempre dentro del procesado de señal:

- Análisis de series en tiempo
- Control automático
- Control de calidad industrial

Nuestro caso se centra en sistemas de control de calidad, donde se basan en el procesado de señales reconocidas que pueden ser modeladas con ayuda de sistemas paramétricos en los que sus parámetros están sujetos a cambios bruscos en instantes desconocidos. Entendemos cambios bruscos como características que suceden muy rápido respecto la frecuencia de muestreo de la medida. Como la mayor parte de la información está contenida en las no-estacionariedades del proceso y la mayoría de los algoritmos adaptativos básicamente solo siguen procesos de variación lenta, la detección de cambios bruscos es un problema de interés en multitud de aplicaciones.

En dichos sistemas, existen 2 casuísticas en detección. La detección de un cambio real, y la acción-detección de una falsa alarma. Las falsas alarmas en sistemas de procesamiento de señal, se asocia a ruido (señales no deseadas), mientras la detección real del evento lo calificamos como señal útil (donde existe la información). Por lo tanto, cualquier análisis de algoritmo basado en las premisas enunciadas, debe estar sujeto a una minimización *del retardo medio en detección de la señal útil* para un *tiempo medio de detección entre falsas alarmas* fijo (los dos objetos clave en CD). Existen algunos Algoritmos de esta familia que directamente optimizan dicha relación (objetivo de prioridad máxima).

Para todos los algoritmos, existe una herramienta que mide la relación de los dos objetos clave del entorno: *Average Run Length Function* (Función ARL), función que normalmente es muy complicada de computar y que suele estar sujeta a aproximaciones. La formulación exacta es la siguiente:

$$L_0 = \frac{N(0)}{1 - P(0)}$$

$$P(z) = \int_{-\infty}^{-z} f_{\theta}(x) dx + \int_0^h P(x) f_{\theta}(x-z) dx, \quad 0 \leq z \leq h$$

$$N(z) = 1 + \int_0^h N(x) f_{\theta}(x-z) dx, \quad 0 \leq z \leq h$$

(eq7)

Para aplicarla a la infinidad de casos que existen y que existirán, dos matemáticos del siglo XX ofrecieron su versión de la formula bajo unas condiciones de cota superior/inferior según el sistema a aplicar (*kniga.pdf* en la documentación de proyecto adjunta), en las que no entraremos en detalle.

En todo caso y bajo cualquier situación nuestro análisis será basado en una hipótesis simple (actividad o no) y nuestra unidad de medida (*sufficient statistic*) será el *log-likelihood ratio* (LLR) de la señal a medir bajo dicha hipótesis:

$$s(y) = \ln \left(\frac{p_{\theta_1}(y)}{p_{\theta_0}(y)} \right) \quad (eq8)$$

Donde p_{θ_i} es la función densidad de probabilidad de la señal bajo la el valor i -ésimo de la hipótesis.

A partir de ahora definiremos nuestro problema como una variación en la potencia de una señal recibida de tipo Gaussiano (tendremos un cambio en la varianza de un proceso Gaussiano).

Por lo tanto tendremos dos hipótesis:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_0 & : \theta = \theta_0 \\ \mathbf{H}_1 & : \theta = \theta_1 \end{aligned} \quad (eq9)$$

La primera supone que la señal a detectar no tiene la componente a detectar, y la segunda hace evidente su aparición.

En un caso simple de toma de decisión, tendríamos que, midiendo el LLR de manera secuencial repetitiva (*Sequential probability ratio test- SPRT*), es decir, muestreando:

$$S_j^k = \sum_{i=j}^k s_i$$

$$s_i = \ln \frac{p_{\theta_1}(y_i)}{p_{\theta_0}(y_i)}$$

(eq10)

Tomamos observaciones de j hasta k del LLR de la señal, en las que en cada paso de observación tenemos una regla de decisión sobre si el cambio se ha realizado o no:

$$d = \begin{cases} 0 & \text{si } S_1^N < h \rightarrow \text{se escoge } \mathbf{H}_0 \\ 1 & \text{si } S_1^N > h \rightarrow \text{se escoge } \mathbf{H}_1 \end{cases}$$

(eq11)

Donde h es un umbral convenientemente elegido (parámetro a seleccionar) según sensibilidad del proceso. La suma S_1^N es llamada *función de decisión* y la decisión es tomada a partir de la ayuda de la denominada *regla de parada*:

$$t_a = N \cdot \min \{K : d_k = 1\} \quad (\text{eq12})$$

En la que d_k es el valor de la regla de decisión en la muestra k de tamaño N y t_a el tiempo de alarma, así, según se describe: la observación se para después de la primer muestra de tamaño N en que la decisión favorece a \mathbf{H}_1 .

Esta es la base sobre la que se sustentan los análisis secuenciales realizados dentro del entorno de *Change Detection*.

II.2.2 - Algoritmo GMA (Geometric Moving Average)

El primero de los dos algoritmos con memoria que presentamos, es un proceso lineal, en el que simplemente sumamos de manera ponderada las contribuciones de cada parte de la muestra (cada término k-ésimo).

Definición

El sistema actúa de manera exponencial, y acumulamos (concepto de memoria) de manera que los valores más antiguos tienen menor peso que los más recientes:

$$g_k = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma_i s_{k-i} = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma_i \ln \frac{p_{\theta_1}(y_{k-i})}{p_{\theta_0}(y_{k-i})} \quad (eq13)$$

Con los coeficientes:

$$\gamma_i = \alpha(1 - \alpha)^i \quad 0 < \alpha < 1 \quad (eq14)$$

El valor α se denomina *factor de olvido*, ya que nos permite regular la velocidad en la que dejamos de tener en cuenta los términos anteriores. Si escribimos la ecuación de forma recurrente, se ve más clara la influencia del coeficiente:

$$g_k = (1 - \alpha)g_{k-1} + \alpha s_k \quad \text{con } g_0 = 0 \quad (eq15)$$

Con tiempo de alarma basado en la regla de parada siguiente:

$$t_a = \min \{k: g_k \geq h\} \quad (eq16)$$

Modelo de aplicación

Una vez definido el algoritmo, procedemos a aplicarlo a un proceso del tipo control de calidad en el que la señal a medir sigue un proceso Gaussiano de función densidad de probabilidad – pdf (*probability density function*):

$$p_{\theta}(y) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{y-\mu}{2\sigma^2}\right)} \quad (eq17)$$

Por ejemplo, cambio en la media del proceso para una varianza constante tendríamos un *sufficient statistic* s_i resumido del estilo:

$$s_i = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \left(y_i - \frac{\mu_0 + \mu_1}{2} \right) \quad (eq18)$$

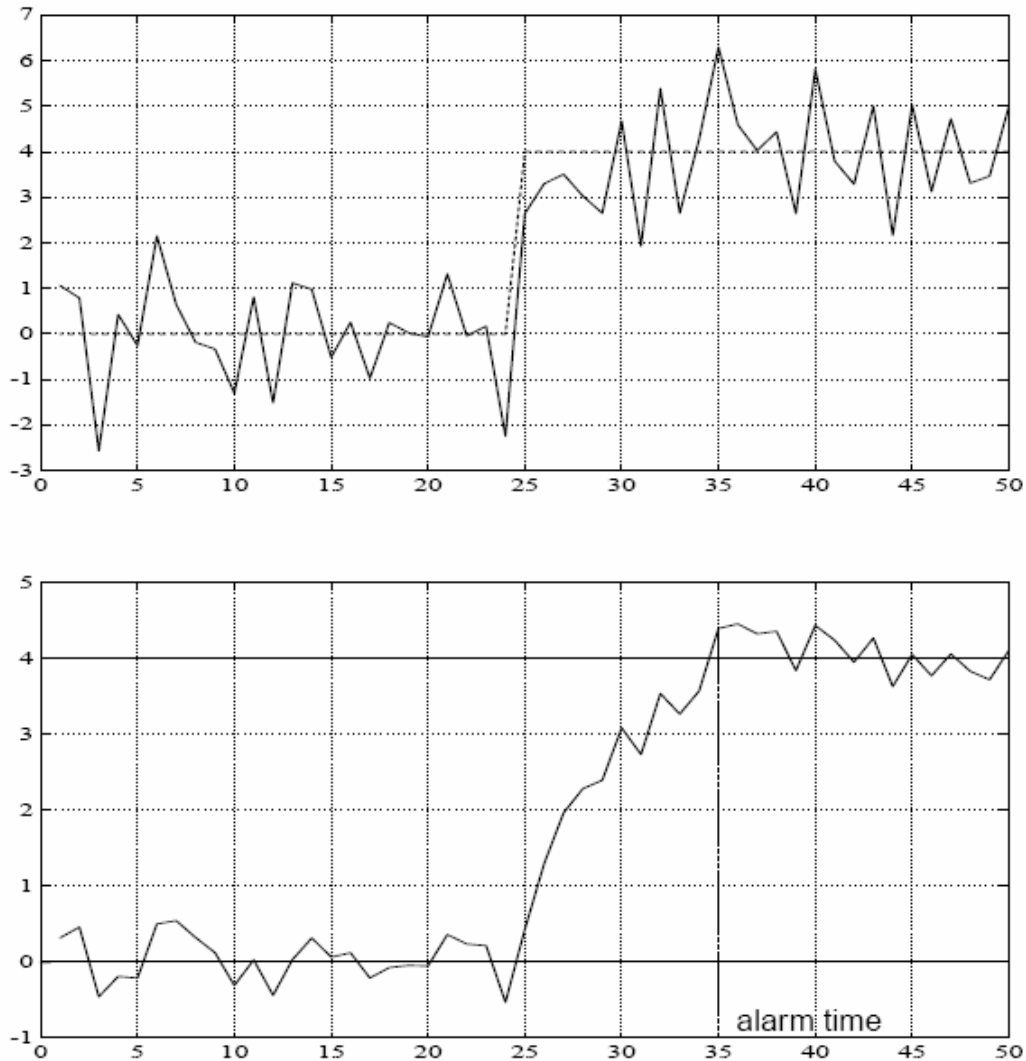


Fig 13. Detección en GMA: señal a detectar y función de decisión.

Si observamos el par de gráficos, vemos en el primero la evolución de la señal a escuchar y posteriormente la evolución de la función de decisión del sistema GMA con factor de olvido de 0,5. Vemos como la señal recibe un filtrado y eso provoca un retardo en la detección del cambio, aun así reducimos su característica de abrupto y podemos asegurar que cuando la función de decisión llega a 4, ese valor es más fiable que el propio de la señal escuchada, que tiene mayor grado de variabilidad. Cuanto mayor sea el coeficiente de olvido en este caso, la función de decisión se parecerá más a la señal a analizar, en cambio, cuanto menor sea, tendremos mayor fiabilidad a costa de un retardo mayor. Por lo tanto, este sistema de detección del cambio de media, estaría destinado a procesos de cambio de magnitud (media) pequeños y sujetos a un nivel de ruido considerable.

De todos modos, en nuestro sistema, los parámetros del proceso son distintos: media nula y varianza dependiente de la hipótesis (cambio en la varianza). El *sufficient Statistic* puede reescribirse así:

$$s_k = \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_1} + \left(\frac{1}{(\sigma_0)^2} - \frac{1}{(\sigma_1)^2} \right) \frac{(y_k)^2}{2} \quad (eq19)$$

De este modo tenemos σ_0 y σ_1 , que son las respectivas potencias de los procesos 1 y 0; 1 el proceso con señal a detectar (hipótesis 1) y 0 el proceso en ausencia de dicha señal (hipótesis 0). Como podemos observar, el *sufficient statistic* es fácilmente computable y se puede contemplar como una función lineal dependiente de la potencia de la señal recibida:

$$s_k = A + By^2 \quad (eq20)$$

Evidentemente, estamos suponiendo un caso en el que conozcamos las dos señales y sepamos que su nivel de potencia emitida es fijo, sino A y B dependen del tiempo, lo que si sabemos es que A siempre tomará un valor negativo y B siempre será positivo ya que $\sigma_0 < \sigma_1$ siempre.

De cualquier manera, presentando este algoritmo se pretende dar a entender que no siempre los algoritmos de detección de cambios proporcionan una mejora, están sujetos al tipo de proceso que tienen que escuchar y a su entorno. Además el proceso de creación de este algoritmo no está basado en la optimización del retardo en detección, es más bien una primera versión que permite asegurar la decisión al casi 100% de veracidad.

II.2.3- Algoritmo CUSUM (Cumulative Sum)

A continuación presentamos un algoritmo que sí pretende ser la solución definitiva, y realmente, bajo simulación, lo es. Para un algoritmo de este estilo, se intenta primeramente inmunizar el retardo al cambio de magnitud., es decir, que el algoritmo sea igual de válido a la hora de detectar un salto de cierta magnitud o cualquier otro de valor menor. Un segundo paso (camino a la perfección) es conseguir que para cualquier nivel de ruido, el sistema sea lo suficientemente robusto para poder detectar el cambio abrupto en la magnitud a analizar.

El algoritmo CUSUM (*Page, 1945a*) parte de la idea que hay que minimizar el retardo en detección para un nivel de tiempo medio entre falsas alarmas (susceptibilidad del sistema al ruido) fijo.

Para ello se “abusa” del concepto memoria, y le vamos a llamar *memoria selectiva*. Nos acordamos de lo que nos interesa, beneficiándonos sólo de las contribuciones positivas del proceso. Eso hace que nuestro sistema pierda su naturalidad matemática, y se convierta en un sistema no-lineal.

Trabajando sobre el sufficient statistic y su función de decisión tenemos varias versiones del algoritmo. En cualquier caso sólo presentaremos 2, una primera que fue la revolución a mediados del siglo XX en el *framework* de *change detection*, versión basada en la intuición en la que se habla de un umbral adaptativo, de manera que se optimiza el problema de diferentes cambios de magnitud. Posteriormente presentamos la opción que más concuerda con nuestro proceso a medir, una solución que nos acerca mas al análisis secuencial *on-line*: las series repetidas de medida (*SPRT*) CUSUM.

Para la primera versión, tenemos que:

$$g_k = S_k - m_k \geq h \quad (eq21)$$

Además:

$$S_k = \sum_{i=1}^k s_i \quad m_k = \min_{1 \leq j \leq k} S_j \quad (eq22)$$

Con lo que h es un valor elegido, según el proceso, y este es fijo, pero el valor del promedio en la muestra m_k hace que el umbral se vaya corrigiendo con el paso del tiempo y así su tiempo de parada (tiempo de alarma):

$$t_a = \min \{k : S_k \geq m_k + h\} \quad (eq23)$$

Una proyección típica de la función de decisión resultante sería:

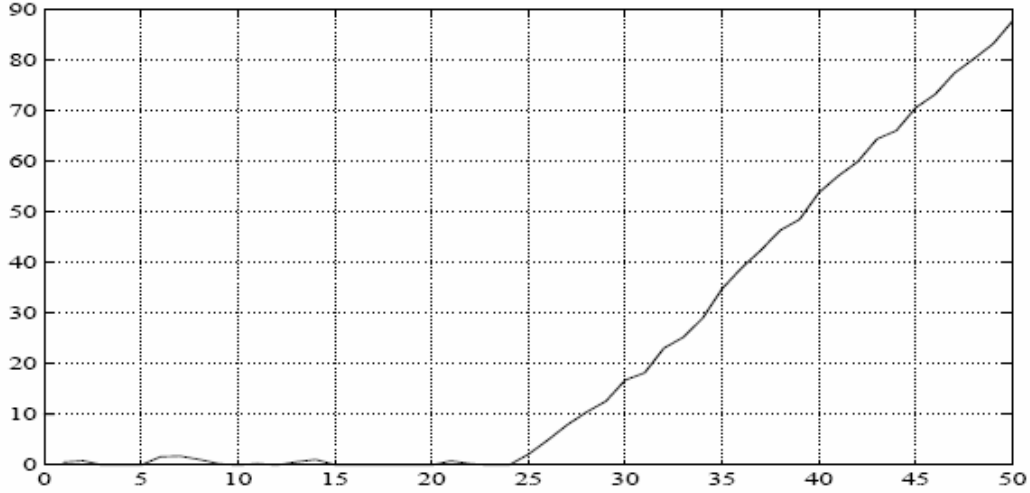


Fig 14. Función de decisión de CUSUM

Dónde en el instante 25 (más o menos) se daría el cambio abrupto.

Operacionalmente es costoso el cálculo de dicho umbral en cada muestreo, aunque teóricamente completa bastante las carencias del simple detector de energía; por lo tanto pasamos a las series repetidas de medidas SPRT CUSUM.

Siempre trabajamos sobre la misma hipótesis:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_0 : \theta &= \theta_0 \\ \mathbf{H}_1 : \theta &= \theta_1 \end{aligned}$$

SPRT se define sobre dos valores, d y T . El parámetro d se refiere a la regla de decisión, y T es el tiempo de parada (como todos los Algoritmos en CD). En el caso de CUSUM SPRT:

$$d = \begin{cases} 0 & \text{if } S_1^T \leq -\epsilon \\ 1 & \text{if } S_1^T \geq h \end{cases} \quad (eq24)$$

Con T el tiempo de finalización:

$$T = T_{-\epsilon, h} = \min \left\{ k : (S_i^k \geq h) \cup (S_i^k \leq -\epsilon) \right\} \quad (eq25)$$

Con lo que en realidad tenemos dos umbrales, h como nivel de potencia a detectar y ϵ el nivel de memoria selectiva a aplicar (cuando reseteamos el valor acumulado de memoria). Para cualquier situación, ϵ y h siempre serán mayores que cero. En la segunda mitad del siglo XX, varios matemáticos conocidos en el mundo de CD han demostrado, en cada situación, que el umbral óptimo de memoria selectiva se da en $\epsilon = 0$ (Shiryayev – 1961, Lorden – 1971, Moustakides – 1986 y Ritov - 1990).

Bajo este concepto tenemos entonces que:

$$g_k = \begin{cases} g_{k-1} + \ln\left(\frac{p_{\theta_1}(y_k)}{p_{\theta_0}(y_k)}\right) & \text{if } g_{k-1} + \ln\left(\frac{p_{\theta_1}(y_k)}{p_{\theta_0}(y_k)}\right) > 0 \\ 0 & \text{if } g_{k-1} + \ln\left(\frac{p_{\theta_1}(y_k)}{p_{\theta_0}(y_k)}\right) \leq 0 \end{cases} \quad (eq26)$$

Por lo que añadiendo que $g_0 = 0$ tenemos una expresión compacta sobre el valor positivo de una expresión:

$$g_k = (g_{k-1} + s_k)^+ \quad (eq27)$$

Esta expresión compacta y no-lineal será la que utilizaremos de ahora en adelante en nuestras simulaciones, y esta versión de CUSUM será la que utilizaremos para las simulaciones en el siguiente capítulo. En la siguiente figura podemos observar el comportamiento habitual del proceso g bajo las condiciones descritas (experto el umbral de memoria selectiva, que no es igual a 0):

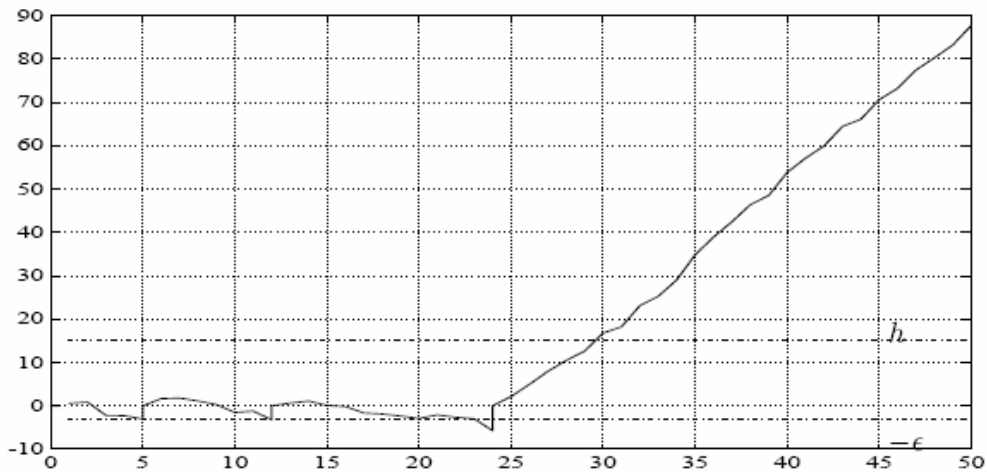


Fig 15. Función de decisión CUSUM SPRT, 3 falsas detecciones y una correcta (0,0,0,1)

En esta performance observamos 4 decisiones, en los instantes: 5, 12, 24 y 30.

En los tres primeros vemos como $d=0$ y en el último $d=1$. Se puede tomar el sistema como una integración de valores sobre una ventana de observación de tamaño aleatorio, en el que el valor de la acumulación decide si continuamos o por lo contrario reseteamos porque nos estamos desviando mucho (memoria selectiva).

III.

Simulación y análisis

III. Simulación y análisis

Una vez explicado el sistema y las herramientas que vamos a usar, vamos a experimentar con él.

III.1- Sistema cooperativo

II.4 Simulación del sistema cooperativo y análisis cualitativo.

Primero trabajaremos con un sistema con coeficientes más o menos elegidos de manera razonable y en segunda instancia trabajaremos con un modelo parametrizado basado en la distancia del usuario más lejano y la distancia relativa entre usuarios. Los coeficientes se distribuyen como se ilustra en la figura 13.

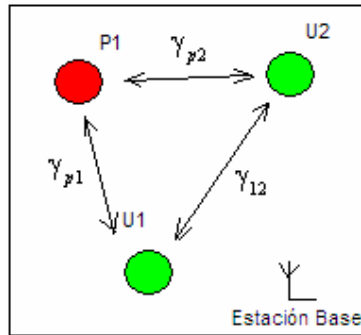


Fig 16. Sistema a analizar, coeficientes de canal.

Bajo este modelo procedemos a un primer simulacro en el que consideraremos los siguientes valores:

$$\gamma_{p1} = 1 \quad \gamma_{p2} = 2.7 \quad \gamma_{12} = 1 \quad (eq28)$$

En un ambiente sin ningún tipo de cooperación tendríamos un análisis de este tipo:

- En el slot 1 el primer secundario (U1) transmite, mientras U2 recibe una señal de este estilo:

$$y_2 = \theta\gamma_{p2} + a\gamma_{12} + n \quad (eq29)$$

Donde la primera contribución es la variable de hipótesis de actividad del primario (1 si está activo, 0 si está inactivo) multiplicada por el coeficiente de canal asociado, la segunda componente es el mensaje que transmite el usuario 1 y n corresponde al coeficiente de ruido.

- En el slot 2 U2 transmite su mensaje y U1 escucha una señal de este tipo:

$$y_1 = \theta\gamma_{p1} + a\gamma_{12} + n \quad (eq30)$$

Vemos simplemente simetría respecto al slot 1.

Como es evidente pensar, en esta situación, el primero que detectará será el usuario que esté más cerca del Transmisor primario, y cuanto mas cerca esté dicho secundario, más fácil será detectarlo. Nuestra simulación solamente tratará sobre la detección de un secundario, el primero que lo detecte será el mostrado ya que suponemos que en la tecnología existirá algún tipo de mensaje de *Jamming* que avise al resto de secundarios la parada de transmisión.

Así pues editamos un fichero *matlab* que simplemente promediará una serie de simulaciones en detección, con y sin el primario transmitiendo, para poder dibujar la carta de operación de un sistema en el que los usuarios no interactúan entre sí (curva de no cooperación) y otro en el que los usuarios dialogan y detectan mediante la ayuda de cooperación.

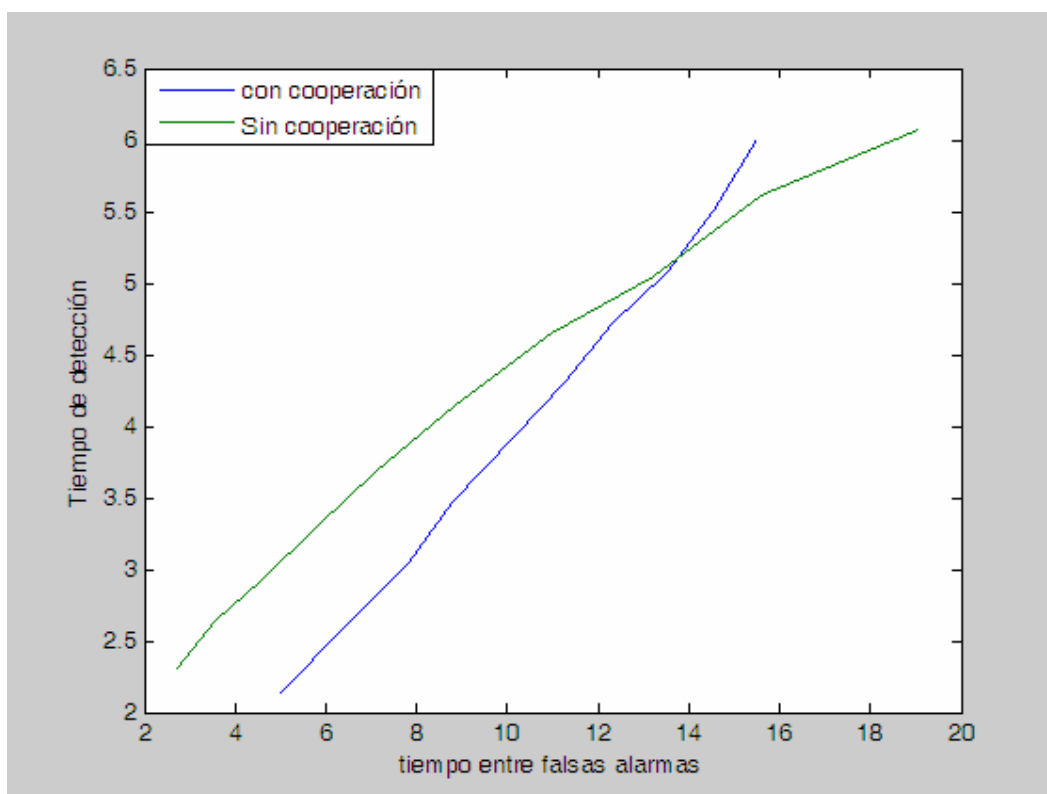


Fig 17. Primera simulación, análisis cualitativo.

Esta primera figura es dibujada con un promediado de 10000 realizaciones y con 10 puntos distintos. Nuestro primer objetivo es meramente cualitativo, no hemos comentado el porqué de la elección de los coeficientes ni hemos mirado la justicia de estos valores, simplemente hemos probado unos valores más o menos acorde o que en mayor o menor medida, respetan una cierta proporcionalidad.

Vemos que el sistema cooperativo nos mejora la detección en ambientes con mucho ruido, y conforme suprimimos el ruido poco a poco, los dos sistemas se acercan hasta el momento en que no sale a cuenta la detección cooperativa.

Si miramos a fondo también podemos observar que influye mucho la potencia de transmisión de los secundarios (o el coeficiente de canal impuesto), ya que a relación de señal útil en detección respecto a la interferente puede modificar el resultado.

Una manera rápida de ver dicha influencia de potencias es la siguiente:

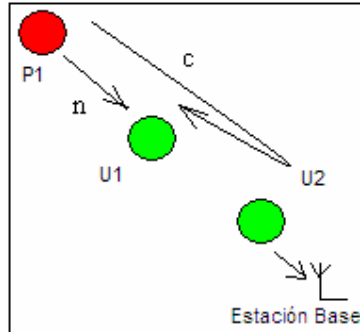


Fig 18. usuario 1 detectando

El usuario 1 recibe dos contribuciones, la reenviada del usuario 2 y la directa del usuario Primario. Dos caminos con dos SNR (Signal to Noise Ratio):

$$SNR_n = \frac{P_1}{N_1 + I_2} \quad (eq31)$$

$$SNR_c = \frac{P_2 + \alpha P_1}{N_2 + \alpha N_1} \quad (eq32)$$

Donde α representa el factor de amplificación que el usuario 2 aplica al mensaje reenviado recibido en la mitad de slot anterior.

Para saber si interesa más un camino u otro, los contraponemos:

$$SNR_n > < SNR_c \quad (eq33)$$

y suponiendo $N_1 = N_2 = E[n]$ tenemos una expresión del estilo:

$$\frac{P_1}{1 + INR} > < \frac{P_2 + \alpha P_1}{1 + \alpha} \mapsto P_1 > < \frac{1 + INR}{1 + \alpha} (P_2 + \alpha P_1) \quad (eq34)$$

Moviendo los factores llegamos a la conclusión:

$$P_2 > < \left(\frac{1 - \alpha INR}{1 + INR} P_1 \right) \quad (eq35)$$

En lo que a α constante, si la INR (*Interferente to noise ratio*) es grande se requiere que $P_2 \gg P_1$, si por lo contrario la INR es baja entonces se admite que $P_2 \approx P_1$. La cooperación es más favorable en entornos de baja INR

III.2- Memoria aplicada

En este apartado, lanzamos una serie de simulaciones del proceso SPRT CUSUM para ver como evoluciona el sistema (como afecta en la detección en cada usuario). No realizamos una comparación con el sistema sin memoria, porque ésta se completa en el siguiente apartado, y el hecho de que la memoria basada en CUSUM es mejor que el sistema GMA es demostrado en la bibliografía

El sistema de simulación se basa en la existencia de la señal a detectar por parte de los secundarios (transmisor primario activo) desde el slot #1, y posteriormente, la detección de la falsa alarma.

De las cuatro figuras que presentamos, tenemos dos de detección de señal útil y otras dos de decisión errónea, y para cada pareja tenemos una medida para señales de alta velocidad y otra para procesos de variación lenta.

Este punto es relevante en cuanto al proceso ya que a la hora de detectar señal que el sistema reenvía una señal adicional. Esa señal adicional puede afectar de dos maneras distintas a nuestra medida. Si la tomamos como un proceso denominado de “*variación lenta*”, la señal se toma como una constante. En el caso de una señal rápida (respecto la medida) tomamos una señal – proceso Gaussiano estadísticamente independiente del resto de señales (aditiva). En la primera figura observamos el promedio de 200 realizaciones en una detección de señal en decisión de **H1** para distintos valores de el umbral **h** dónde el mensaje enviado por parte de los usuarios es de alta velocidad (*High bit rate*).

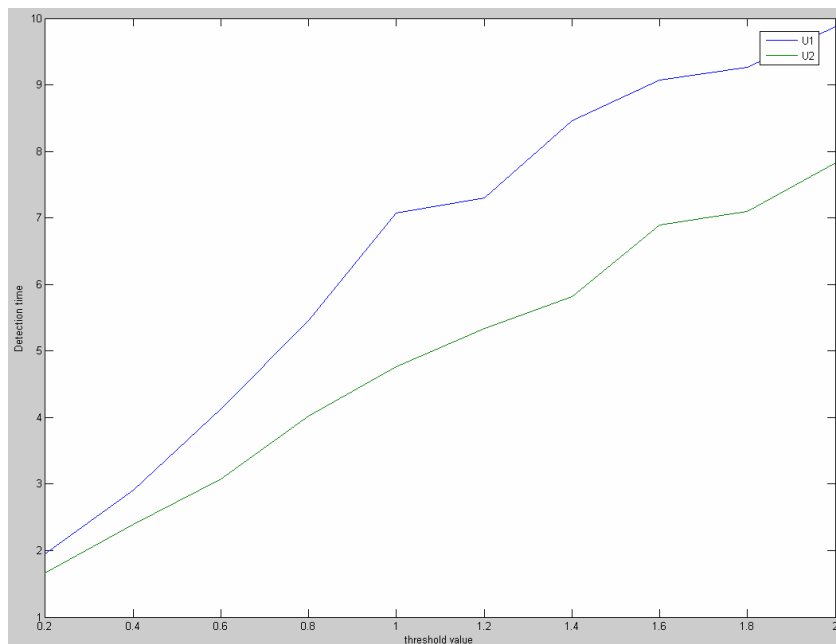


Fig. 19 . Detección de señal con memoria en High bit Rate

Obviamente el usuario 2 está más cerca del primario, por lo tanto detectará antes, pero vemos su reacción al umbral, que posteriormente compararemos con el resto de figuras.

Bajo la misma condición de las señales, detectamos la falsa alarma:

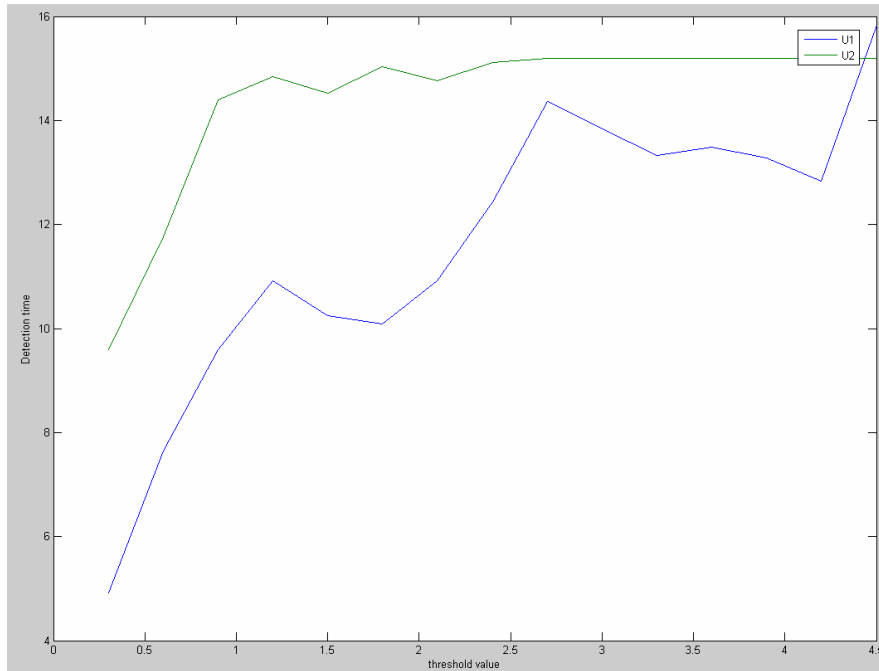


Fig 20 . Detección de falsa alarma con memoria en High bit Rate

Podemos ver la gran variabilidad de la detección ya que ahora solo medimos ruido. Se observa como el usuario 1 parece más susceptible a la detección de falsas alarmas.

Las dos siguientes figuras son homólogas a las vistas hasta ahora, sólo que tratamos la señal-mensaje de los usuarios como de baja velocidad (*low bit rate*) respecto al sistema de detección.

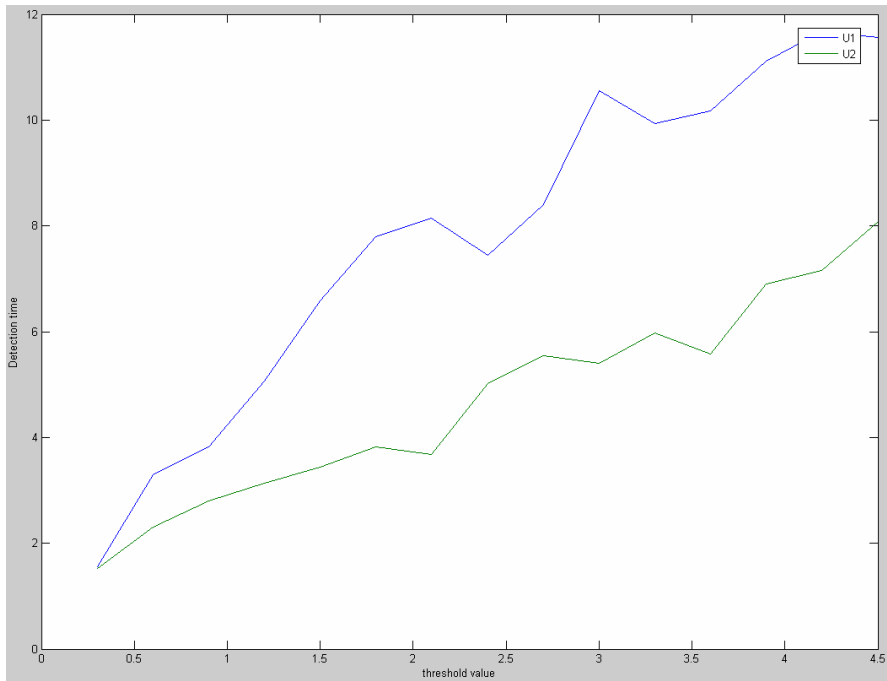


Fig. 21 . Detección de señal con memoria en Low bit Rate

Vemos una progresión parecida en cuanto a detección pero si observamos ambas progresiones comparándolas con las de alta velocidad, vemos que la detección es más rápida en procesos lentos.

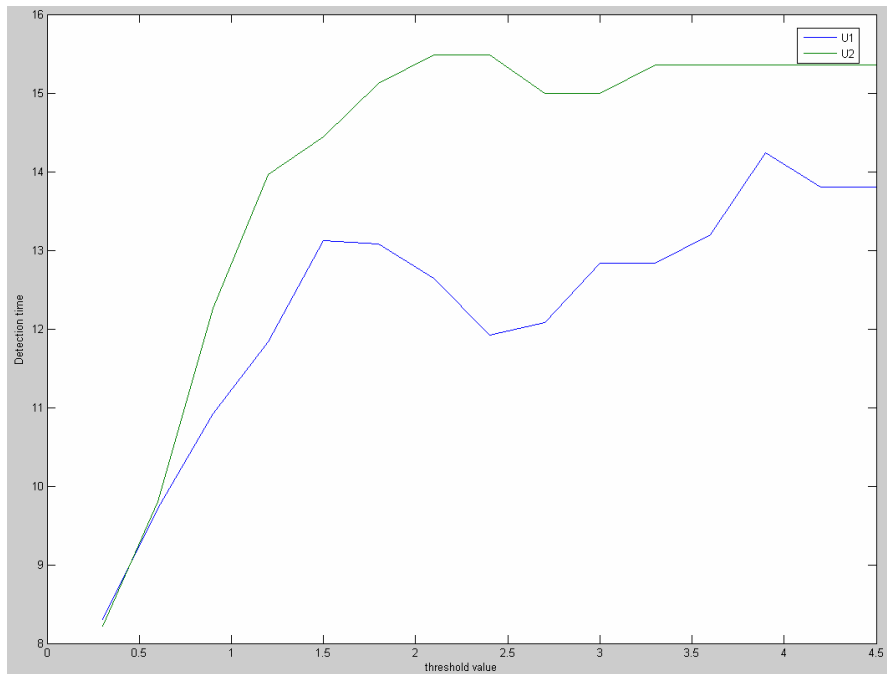


Fig 22 . Detección de falsa alarma con memoria en Low bit Rate

Obviamente, si no hay señal añadida en el proceso de detección (en Low Bit rate) no hay contribución externa a la detección que haga que el sufficient statistic se vea decrementado por otra señal que no sea la dedicada a la detección.

El sistema CUSUM detecta un cambio en la varianza del proceso medido, si consideramos una de las señales como constante (proceso de variación lenta), su varianza es nula, con lo que no influye en la detección del cambio de varianza.

III.3- Sistema completo

III.3.1- Análisis conjunto

Como colofón de la simulación, probaremos el sistema en conjunto, analizaremos matemáticamente y bajo simulación MATLAB la estructura hasta ahora presentada. Pero para poder mapear bien todas las posibles inclemencias del entorno, usamos un modelo paramétrico de distancias. Para ello disponemos de una manera lógica los agentes en nuestro sistema:

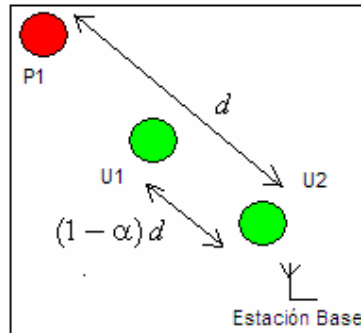


Fig 23 . distribución de sistema parametrizada

En el sistema destacamos dos parámetros:

- d : distancia entre el usuario primario (registrado) y el usuario secundario (sin licencia) más lejano.
- α : factor de posición relativa en la línea de separación d .

A continuación realizamos dos simulaciones, la primera a distancia d fija de 100 (unidades relativas a nuestro sistema en base a los coeficientes de canal con un nivel de umbral variable adecuado) en la que tomamos diversos valores de α ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$) y comparamos como la memoria mejora el sistema original.

El método de representación es el presentado en el primer tema del documento, la carta de operación del sistema secuencial: Tiempo de detección medio (eje Y) en función del tiempo medio entre falsas alarmas (eje X).

Al variar al parámetro α se pretende ver cómo el sistema es sensible a la disposición de los usuarios secundarios en un área determinada.

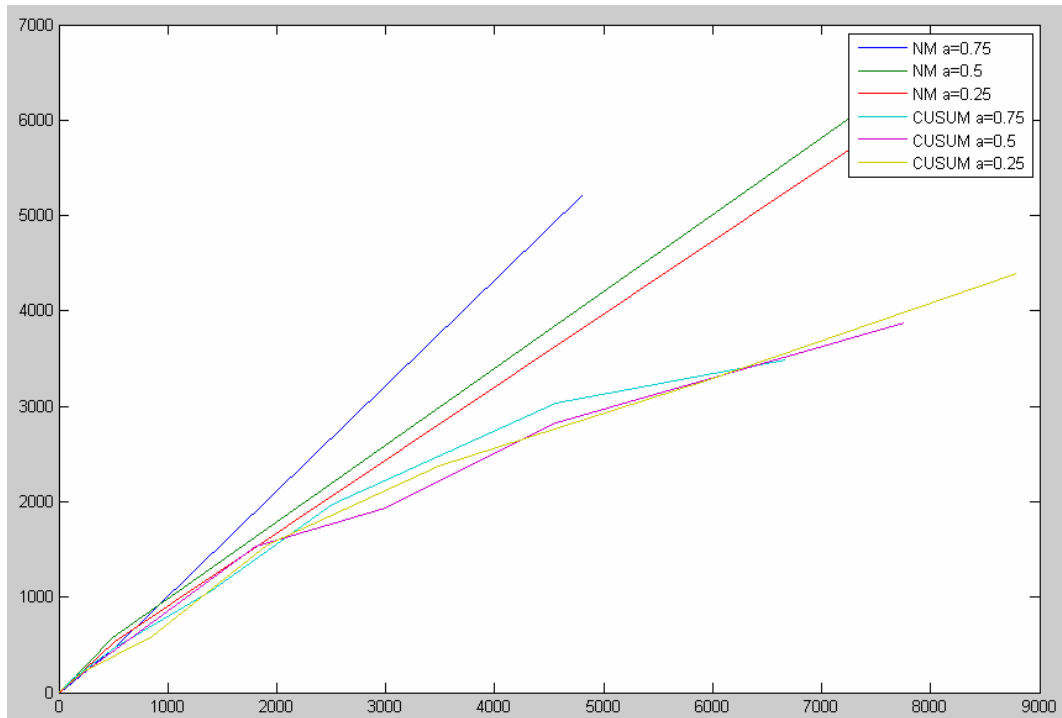


Fig 24. Sistema completo con cooperación y memoria para $d=100$ y diversos valores de α

En la figura vemos 3 progresiones para cada sistema, ambos cooperativos, uno con y otro sin memoria.

Podemos observar como las *performance* del sistema sin memoria tienen una característica más o menos lineal y efectivamente, si acercamos el usuario 1 al primario (línea roja) éste consigue detectar antes su actividad. Podríamos decir que en este caso, cuanto α es más pequeño, el sistema detecta antes, ya que efectivamente, el primer usuario en detectar en cooperación es el U1 ya que tiene “la información más a mano”.

Al introducir el sistema CUSUM tenemos que la actuación se convierte en una exponencial muy suave en la que realmente no se distingue un efecto de α sobre ella.

Podemos decir que la disposición de usuarios no afecta mucho al sistema con memoria, y que en el sistema sin memoria afecta directamente.

Ahora pasamos a realizar un análisis opuesto en cuanto a variación de parámetros. Fijaremos α a 0,5 y variamos la distancia en tres órdenes de magnitud con el fin de ver un poco el área de cobertura de la bondad de nuestras mejoras.

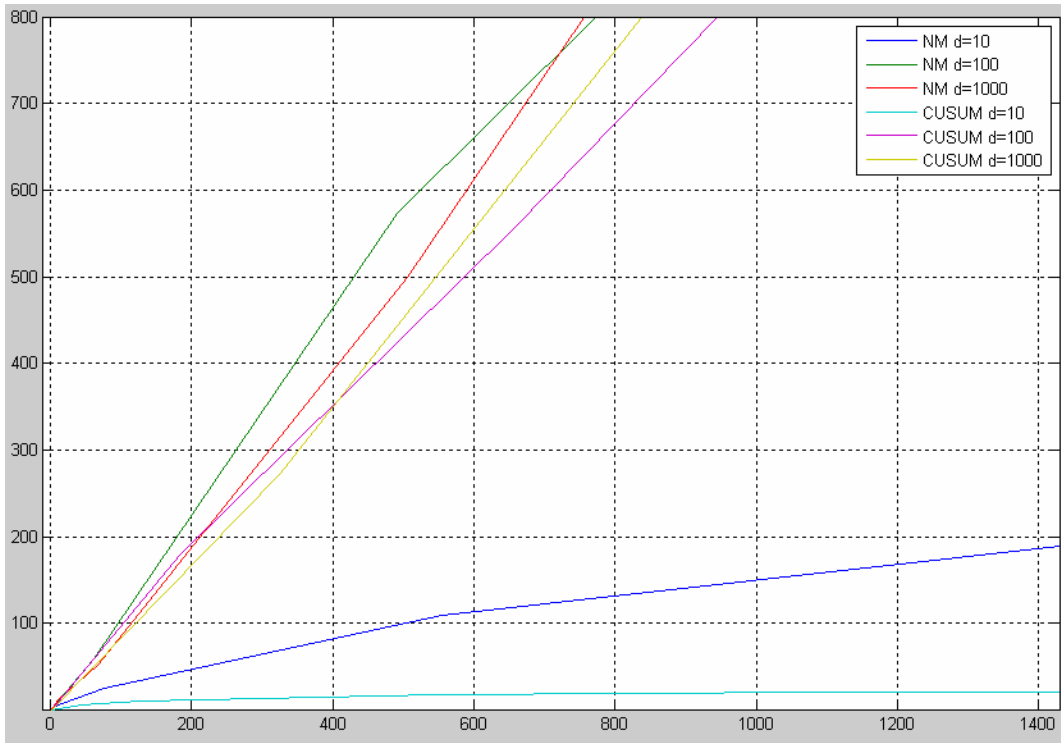


Fig 25. Sistema completo con cooperación y memoria para $\alpha = 0.5$ y d variable.

Para esta figura, es bueno observar las parejas de curvas con mismo valor de parámetros pero con y sin memoria. El primer par de curvas, se pueden destacar las curvas azul marino y azul cielo, que hacen referencia a la distancia más corta donde podemos ver como CUSUM trabaja excepcionalmente bajo unos 10 time-slots para detectar cualquier señal, vemos una ganancia en detección muy grande.

Los otros dos pares de curvas: rojo – amarillo y verde – morado vemos que la ganancia no se hace tan evidente pero aun así, ambas líneas referidas a CUSUM (amarilla y morada) permanecen por debajo de las características sin memoria.

Por lo tanto, la distancia afecta de manera directa en la cooperación (se desplazan los pares de curvas por igual) y explícitamente incide en la ganancia provocada por el uso del algoritmo CUSUM de manera positiva.

Podemos ver como la aplicación de las herramientas propuestas depende mucho de la distancia o el tamaño de la celda de comunicaciones en la que nos encontremos.

Si profundizamos en el análisis matemático, podemos ver un poco las “reglas de juego”.

Vamos a realizar un análisis usuario a usuario para ver como afectan nuestras herramientas a su detección.

Usuario secundario #1

El análisis de dicho usuario se realiza en el slot en que el usuario 2 está transmitiendo a la estación base y el usuario 1 está recibiendo la contribución de U2 y la de P1.

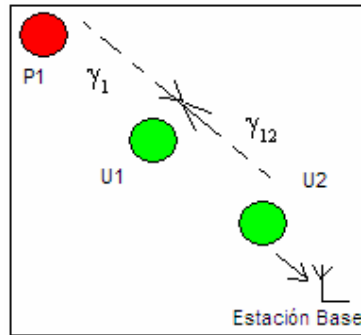


Fig 26. Usuario secundario en detección

La potencia recibida en cada momento se puede entender como:

$$\sigma_c^2 = \theta (P_1 + P_{12} P_2 \beta^2) + P_n (1 + \beta^2 P_{21}) \quad (eq36)$$

Suponiendo potencias unitarias (señales y ruido) tenemos que:

$$\approx \theta (\gamma_1 + \gamma_{12} \gamma_2 \beta^2) + 1 + \beta^2 \gamma_{21} \quad (eq37)$$

Con canal recíproco $\gamma_{12} = \gamma_{21}$ y coeficiente de canal de valor:

$$\beta^2 = \frac{1}{\theta \gamma_2 + \gamma_{12} + 1} \quad (eq38)$$

Para calcular el sufficient statistic, tenemos el valor de dicha varianza en los dos casos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\theta_1}^2 = \gamma_1 + \frac{\gamma_{12} \gamma_2}{\gamma_2 + \gamma_{12} + 1} + 1 + \frac{\gamma_{12}}{\gamma_2 + \gamma_{12} + 1} \\ \sigma_{\theta_0}^2 = 1 + \frac{\gamma_{12}}{\gamma_{12} + 1} \end{array} \right. \quad (eq39)$$

Con lo que el sufficient statistic queda de este modo:

$$s_k = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{(2\gamma_{12} + 1)(\gamma_2 + \gamma_{12} + 1)}{(\gamma_{12} + 1) [\gamma_{12}(\gamma_1 + \gamma_2 + 2) + (\gamma_1 + 1)(\gamma_2 + 1)]} \right) + 1 \frac{\left[\frac{\gamma_{12} + 1}{2\gamma_{12} + 1} - \frac{\gamma_2 + \gamma_{12} + 1}{\gamma_{12}(\gamma_1 + \gamma_2 + 1) + (\gamma_1 + 1)(\gamma_2 + 1)} \right]}{2} \quad (eq40)$$

Con lo que inspeccionando un poco vemos como si $\gamma_{12} \rightarrow \infty$ entonces A y B tienden a 0 y si $\gamma_{12} \rightarrow 0$ el sufficient statistic aumenta.

A través de esto y de las simulaciones realizadas, podemos definir un poco la tabla que dictamina qué es mejor para el usuario 1 en cada situación:

D \ α	25%	50%	75%
Pequeña (10)	Cooperación	Cooperación	Cooperación
Mediana (100)	N . E .	Cooperación	Cooperación
Grande (1000)	N . E .	Cooperación	Cooperación

Tabla 1 .Distribución parametrizada en detección de U1

Vemos como cuanto más grande es la distancia, menos efecto tiene la cooperación en la detección del usuario 1, y cuanto mas lo acercamos al usuario primario (registrado) menos importa usar la cooperación o el sistema tradicional (*stand alone detection*).

De manera análoga, trabajamos con el usuario secundario 2, en este caso, la detección se da cuando el usuario secundario 1 transmite a la estación base, dónde el U2 escucha el mensaje del usuario 1 y la señal de transmisión del usuario primario (registrado):

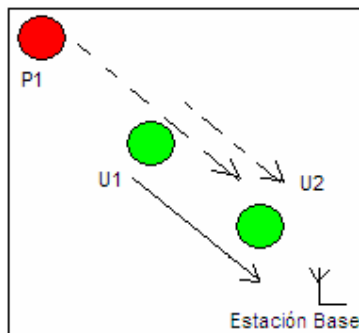


Fig 27 . Usuario secundario 2 en detección

Con lo que a través de un razonamiento como el del caso del usuario 1, llegamos a una tabla de decisión:

D \ α	25%	50%	75%
Pequeña (10)	Cooperación	Cooperación	Cooperación
Mediana (100)	Cooperación	N . E .	N . E .
Grande (1000)	Cooperación	N . E .	N . E .

Tabla 2 .Distribución parametrizada en detección de U2

En este caso del usuario más lejano del usuario primario, el efecto de la distancia se mantiene pero el valor de α influye de manera creciente, es decir, cuanto más grande es, menor es la ganancia del sistema cooperativo, con lo que a partir de un valor bajo, no importa qué sistema usar, si el cooperativo o el tradicional.

Simulación final

Como simulación definitiva tenemos la presentada en el CISS 2007 presentando el *paper* adjunto en la documentación del proyecto (*CISS071.pdf*). Las condiciones del sistema eran las siguientes:

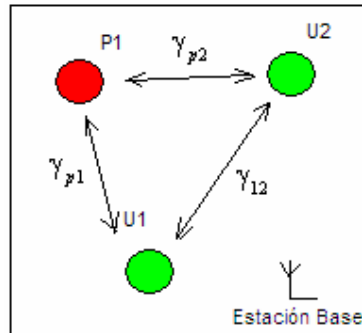


Fig 28. Sistema bajo análisis

Dónde $\gamma_{p1} = 1$, $\gamma_{p2} = 0.1$ y $\gamma_{12} = 0.5$ y las curvas dibujadas hacen referencia al sistema sin cooperación ni memoria, luego añadiendo sólo cooperación y memoria por separado y el resultado final combinado:

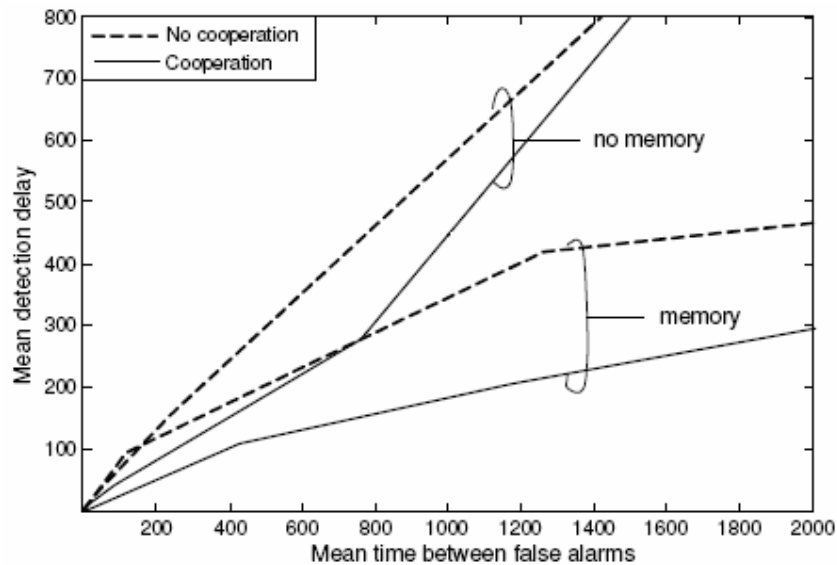


Fig 29. Simulación completa del sistema

En la figura podemos ver que los resultados numéricos confirman la mejora respecto el sistema original (usuarios sin cooperación ni memoria). Las líneas discontinuas hacen referencia al sistema sin cooperación y las continuas con el efecto cooperativo entre usuarios, además están agrupadas por *no memory* (sin CD algorithm) y *memory* (con al algoritmo CUSUM en SPRT).

Esta simulación confirma las figuras previas y define completamente el motivo de todo este trabajo.

IV.

Conclusiones

IV. Conclusiones

Después de meses simulando y con muchos problemas de computación (hardware) pudimos encontrar resultados numéricos que nos permiten corroborar (en mayor parte) lo que la teoría decía.

Teníamos algunas dudas debido a que en muchas fases del desarrollo matemático habían lagunas o bien propias, o bien porque los propios autores de los cuales estábamos absorbiendo conocimiento habían obviado en sus explicaciones.

A pesar de todo ello, logramos introducirnos en este mundo del *Change Detection*, logramos contribuir en *Cognitive Radio*, CISS 2007 (*Conference on Information Science and Systems*) y conseguimos entender lo que es el futuro de las comunicaciones.

Hay que ahorrar, hay que reciclar lo que tenemos, evitar residuos inútiles, convertirlos en *inputs* de nuevos procesos y *Cognitive Radio* habla de ello: optimizar el espectro radioeléctrico.

En este trabajo presentamos dos herramientas, y las aplicamos a un entorno multiusuario intentando realzar el concepto de *Cognitive Radio* como una solución completamente viable, una solución que nos permite mejorar nuestro uso del espectro, e incluso admitir la coexistencia de usuarios no registrados en un entorno de usuarios registrados.

Las herramientas propuestas están sujetas a condiciones de uso. En el caso de la cooperación, se exige restricción en las potencias de transmisión guardando cuidado de las distancias cubiertas. Por otro lado, el introducir memoria al sistema siempre ayuda, en todo momento mejora la detección de la actividad primaria; únicamente hay que destacar que la ganancia en detección a través de la aplicación de algoritmos de detección de cambios se hace más evidente cuanto más cercanos están los usuarios secundarios al primario.

Como trabajo futuro, se podría generar algún mecanismo dependiente de la distancia para poder decidir en qué momento se utiliza cooperación o método tradicional. De cara al uso de memoria, se debe mantener un seguimiento del *state of art* del *workgroup*. Actualmente la investigación en el mundo del *change detection* está más activa que nunca, métodos de detección de cambios con posible previsión de sucesos son necesarios para todo tipo de entornos económicos, catástrofes naturales, poblaciones biológicas, etc. *Change Detection* es un mundo matemático necesario en el tiempo en el que vivimos y se debe mantener vivo para seguir mejorando.

V.

Bibliografía Consultada

V. Bibliografía consultada

Bases en el workspace de Cognitive Radio:

- *Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications*, Simon Haykin, Life Fellow, IEEE;
IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 23, NO. 2, FEBRUARY 2005
- *Cognitive Radio Formulation and Implementation*, Thomas W. Rondeau, Bin Le, David Maldonado, David Scaperoth, Charles W. Bostian;
Center for Wireless Telecommunications, Virginia Tech, Mail Code 01 1 1, Blacksburg, VA 24061-011 1, USA

Diversidad cooperative:

- *Agility Improvement through cooperative diversity in cognitive radio*, G. Ganesan, YG Lee
Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2005

Núcleo del change detection:

- *Detection of Abrupt changes: Theory and application*, Michèle Basseville (IRISA/CNRS Rennes France), Igor V. Nikiforov (Institute of Control Sciences Moscow Russia)

Bases del análisis secuencial:

- *Sequential Analysis*, Abraham Wald , Dover Phoenix Editions 1973.

Paper presentado en CISS 2007:

- *Detecting Primary transmitters via Cooperation and Memory in Cognitive Radio*, Y. Bar-Ness, O. Simeone, T. Betran.

Ciss.pdf adjunto en el CD de Proyecto.