

2.4. MODELADO Y SIMULACION DE CANALES DE COMUNICACIONES.

2.4.1. Introducción.

Cuando hablamos de canal de comunicación entendemos por este termino todo aquello que se interpone entre los equipos que hacen posible la comunicación a larga distancia y que constituyen la fuente y sumidero de la señal de información. En la mayoría de los casos este medio que se interpone en la señal de interés modifica o altera de forma perjudicial la onda radioeléctrica produciendo una serie de deterioros que pueden clasificarse en atenuaciones, distorsiones lineales, ruido, interferencias de otras señales parecidas a la de interés,... Nuestro interés se va a centrar en el modelado del canal de propagación. Las técnicas utilizadas para contrarrestar los efectos del canal son la modulación del sistema, codificación, diversidad, ecualización.

El desarrollo de estas técnicas puede obtenerse con la experimentación. Este método resulta costoso si ha de realizarse in situ y con los medios físicos que definen el canal real. Surge la posibilidad de utilizar simulaciones de sistemas de comunicaciones, ya que de forma practica y rápida es capaz de desarrollar métodos para mejorar la señal recibida sin la necesidad de disponer de equipos físicos que representen a los reales. Estas simulaciones deben de disponer de un modelo ajustado de canal que nos proporcione unos resultados fiables. Estos modelos son representaciones matemáticas o algorítmicas de la relación que existe entre la entrada y la salida en los puntos que definamos nuestro canal. Estos modelos son derivados de la teoría que define el medio de propagación así como también pueden ser derivados de medidas externas. El canal esta determinado por las características del medio que lo forma pudiendo ser el espacio libre, atmósfera, cables, guías de ondas, o fibras ópticas. Una vez especificado el medio para acotarlo hay que introducir en su caracterización ciertas condiciones físicas y restricciones geométricas que ajustan el modelo al sistema de comunicaciones estudiado y que define la función de transferencia que el medio establece entre el receptor y el transmisor. Algunas de estas restricciones son el ancho de banda, la frecuencia de portadora, velocidad de transmisor o receptor si están en movimiento, tipo de entorno, etc. Así y aunque dos sistemas de comunicación utilicen el mismo medio físico, la diferencia de sistemas puede provocar que el modelo de canal sea completamente distinto. Un ejemplo de esto, y a pesar de ser transmisiones radioeléctricas, es la gran diferencia que existe entre una transmisión por satélite que ve un canal de espacio libre y un canal que modele la comunicación entre sistemas móviles el cual será descrito por canales multicaminos variantes en el tiempo.

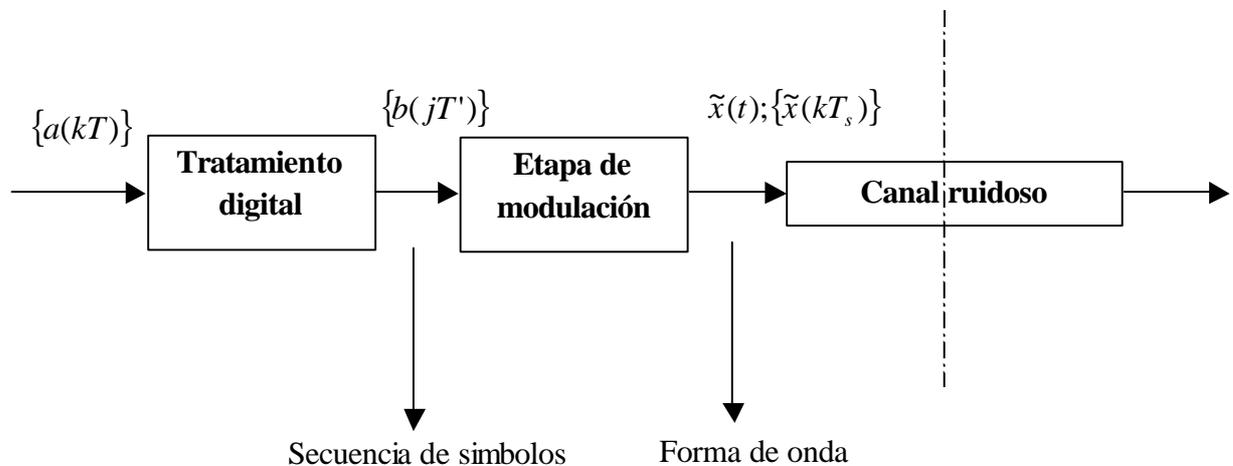
La obtención del modelo conlleva la resolución del modelo físico de propagación (ecuaciones de Maxwell) que definen al medio utilizado. Posteriormente el resultado de las ecuaciones de Maxwell hay que convertirlo en una forma en la que sea fácilmente simulable y para ello hay que establecer el tipo de simulación que conviene al tipo de canal que se estudia en función de sus características, linealidad o no linealidad, o en función de su variancia o no en el tiempo. Por ultimo y para realizar la simulación hay que especificar los valores de los parámetros que concretan el canal para un caso específico de estudio.

Existen diferentes tipos de canales. Los canales de radio móviles son variantes en el tiempo, produciendo éstos desvanecimientos en la señal que comparados con la tasa de símbolo o con el ancho de banda se pueden clasificar en desvanecimientos lentos o rápidos y que provocan una caracterización del canal como variante en el tiempo. Esto repercute en la forma de simular que adoptemos para un determinado canal. La función de transferencia modelará de forma adecuada los sistemas que sean invariantes en el tiempo o cuyo desvanecimiento se produzca de forma lenta. En este caso tenemos

modelos que se presentan a la señal de forma estacionaria en el tiempo y que por lo tanto establecen una relación permanente entre la entrada y la salida al canal.

Si no es así, y el canal no se mantiene constante o su cambio es rápido comparado con la tasa de cambio de la señal, el canal se presenta a la señal como variante en el tiempo y debe ser simulado con un modelo de etapas en línea con retrasos. Las ganancias de cada etapa deben variar a una velocidad adecuada al modelo de canal que se pretende simular. Estas pueden ser procesos aleatorios que de nuevo están caracterizados por el tipo de canal que se quiera establecer. Todo este proceso hace que los modelos de comunicaciones sean difíciles de caracterizar, aunque no tanto de simular.

Hasta ahora los modelos de canales han intentado plasmar de forma fiel lo que le ocurre a la señal radioeléctrica intentado modelar por separado cada uno de los bloques en que puede dividirse un canal de comunicaciones.



También se puede intentar hacer una abstracción e intentar caracterizar en un modelo discreto todos los bloques que tratan de modificar la señal analógica. Este paso llamado simulación a nivel de forma de onda y que es el expuesto anteriormente es sustituido por un modelo discreto que a nivel de bit realiza la simulación del sistema de comunicación prefijado.

La simulación a nivel de forma de onda realiza la simulación a una tasa de 8 a 16 veces la tasa de símbolo mientras que en el caso de la simulación con el modelo discreto la simulación se realiza a la tasa de símbolo descrita por el modelo. Esto provoca un gran ahorro computacional en la simulación discreta con respecto a la analógica y que solo se utilice un bloque que trate de englobar la abstracción de todos los que componen el canal digital de radio de un sistema de comunicaciones.

Este modelo discreto puede ser modelado por un proceso de Markov. Para obtener este modelo discreto hay que tener una serie de patrones de error que caractericen al canal de radio digital del sistema analógico y que pueden ser obtenidos mediante simulación a nivel de onda o por patrones de errores de sistemas reales.

2.4.2. Descripciones de canales móviles.

Las comunicaciones móviles en sistemas de radio celular tienen lugar entre una estación base fija (BS) y un número de estaciones móviles itinerantes (MS). El área geográfica en la cual estas comunicaciones ocurren se llama celda, y se puede

considerar que el borde de la celda marca la máxima distancia en la cual una estación móvil puede deambular antes de que las comunicaciones con la estación base que domina la celda pase a deteriorarse. Las celdas en comunicaciones móviles varían de forma sustancial en tamaño y forma. Tradicionalmente su tamaño es grande, hasta 30 Km de radio, donde difícilmente existen caminos directos de propagación entre la estación base y la estación móvil. Últimamente se están usando celdas de tamaño menor, de hasta 1 Km de radio donde es más probable que se de un camino de propagación directo. Las celdas conocidas como microceldas cuyo tamaño puede ser de hasta 100m de radio están consideradas a veces en un bloque en una ciudad. En las microceldas LOS se convierte en una característica bastante a menudo. La presencia de LOS tiene importancia decisiva en la propagación y esto significa que las características de propagación están fuertemente determinadas por el tamaño y forma de la celda.

Las celdas están organizadas en grupos llamados racimos que usan el espectro completo asignado por los cuerpos que regulan las comunicaciones por radio.

Cuando la distancia entre BS y MS aumenta el nivel de señal media recibida tiende a decrecer. Sobre distancias relativamente cortas la señal media recibida es prácticamente constante, pero el nivel de señal recibida puede variar rápidamente hasta en cantidades de 40 dB. Estas variaciones rápidas se conocen como desvanecimientos rápidos. Debido a la itirrenancia que realiza el móvil por la zona de cobertura este pasa en ocasiones por zonas de sombra que repercuten en la señal. Este fenómeno se denomina desvanecimiento lento y al igual que el rápido serán tratados posteriormente.

Consideremos una BS transmitiendo una portadora sin modular que cubre el área en la cual está moviéndose la MS. La MS no recibe una sola versión de la señal transmitida, sino que debido a los obstáculos que existen en el entorno de propagación de la señal y a las reflexiones que se producen en estos, al receptor le llega un conjunto de replicas de la señal emitida por el transmisor en un determinado instante espaciadas en el tiempo y con distintas atenuaciones. De esta forma la amplitud que tenemos en el receptor puede ser bastante distinta a la que hemos generado en el receptor y que generalmente si hemos utilizado una modulación de fase sería constante. El retraso que experimentan las versiones reflejadas de la señal transmitida provoca que en el receptor que se pueda añadir estas versiones de forma constructiva o de forma destructiva dependiendo de la relación entre las fases de las señales recogidas en las antenas. Cuando esto ocurre decimos que hemos tenido un desvanecimiento debido al multicamino. Se puede dar el caso de que la señal prácticamente se haga cero y que en ese caso la relación señal a ruido se haga negativa.

A parte de este problema debemos considerar que en los sistemas reales no transmitimos señales con una portadora no modulada sino que están sustentan la información en forma de transmisión digital. En este caso las componentes retrasadas pueden provocar interferencia entre símbolos (ISI) si la tasa de símbolos es lo suficientemente alta como para que el tiempo de símbolo sea pequeño comparado con los retrasos de las señales y una componente retrasada con información de otro símbolo anterior llegue al receptor cuando este está recogiendo un símbolo posterior. Esto nos obliga en muchos casos al uso de ecualizadores.

Consideraciones prácticas hacen que en celdas largas debamos utilizar ecualizadores para incluso tasas de símbolo bajas 64ks/s cuando al receptor le llegan componentes retrasadas con 10ms, como en GSM, que utiliza una tasa de 271 kb/s. En comunicaciones inalámbricas interiores el retraso de las componentes reflejadas esta limitado a pocos microsegundos con los que podemos mantener tasas de símbolo de hasta Mb/s. Las llamadas picoceldas, entorno de comunicaciones interiores, pueden soportar algunos Mb/s ya que aquí el retraso es de decenas de nanosegundo.

Dependiendo del canal que tengamos en nuestro sistema de comunicaciones móviles debemos optar por una u otra caracterización que definan de que forman se van a producir los desvanecimientos, en el caso de que existan, la profundidad de esto, la duración, y características estadísticas en el caso de que existan. Esto lo determina como hemos dicho el medio de propagación junto con las características de la señal que se vaya a utilizar, ya que de ésta depende de que el efecto multicamino, inherente del canal físico, provoque o no interferencia intersimbolos.

Si suponemos que en el canal no está presente en el receptor ninguna señal reflejada lo podemos denominar como canal gaussiano o canal de ruido blanco gaussiano. Sin embargo es difícil que en un canal de comunicaciones móviles se de este caso, a pesar de ser el más sencillo para estudiar ya que el ruido de transmisión puede ser generado antes del receptor añadiéndoselo al que de por si ya genera el receptor. La existencia de este canal implicaría un medio en el que no existieran componentes reflejadas y donde el receptor o transmisor no estuvieran en movimiento. Este tipo de canales pueden ser de utilidad pues suponen el limite de prestaciones que puede ofrecer un sistema que se encuentre en un canal de radio móvil. La BER en estos entornos son el limite al que puede aspirar un sistema en condiciones normales, tales como en un canal con desvanecimiento Rayleigh o Rician que veremos a continuación.

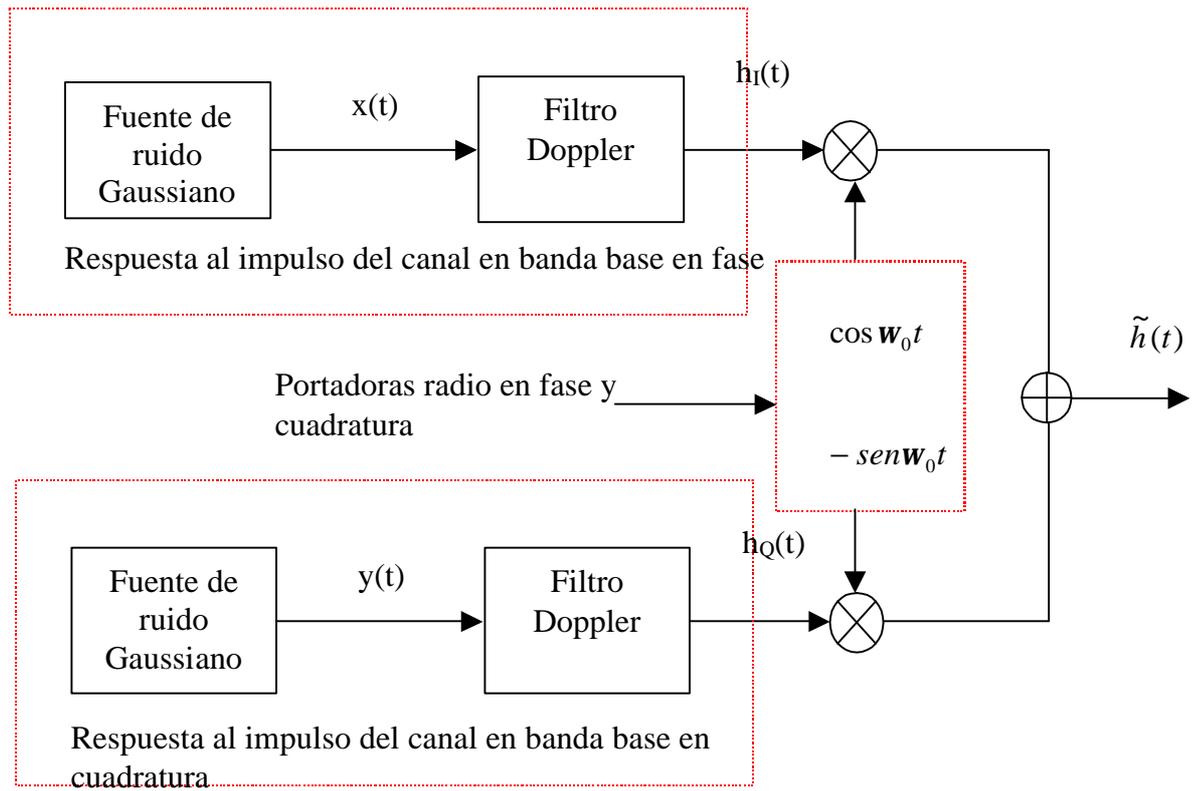
2.4.2.1. Canal con desvanecimiento Rayleigh.

Si cada componente multicamino en la señal recibida es independiente por el teorema central del limite de la suma resultante de estas componentes tendremos una variable con distribución gaussiana. La envolvente de esta variable tendrá una función de densidad de probabilidad Rayleigh.

La probabilidad de que tengamos un desvanecimiento profundo es el área entre $3s$ y infinito donde s es la media de la distribución.

La respuesta al impulso de un canal móvil con desvanecimiento Rayleigh es una delta cuyo magnitud en cada momento esta definida por la distribución Rayleigh. El receptor experimentará desvanecimientos profundos cuando el valor asignado a la delta sea pequeño y al contrario cuando el valor sea grande. En este caso el canal Gaussiano sería representado por una delta cuyo valor permaneciera de forma constante en el tiempo, o sea un canal ideal al que se le añadiría ruido gaussiano.

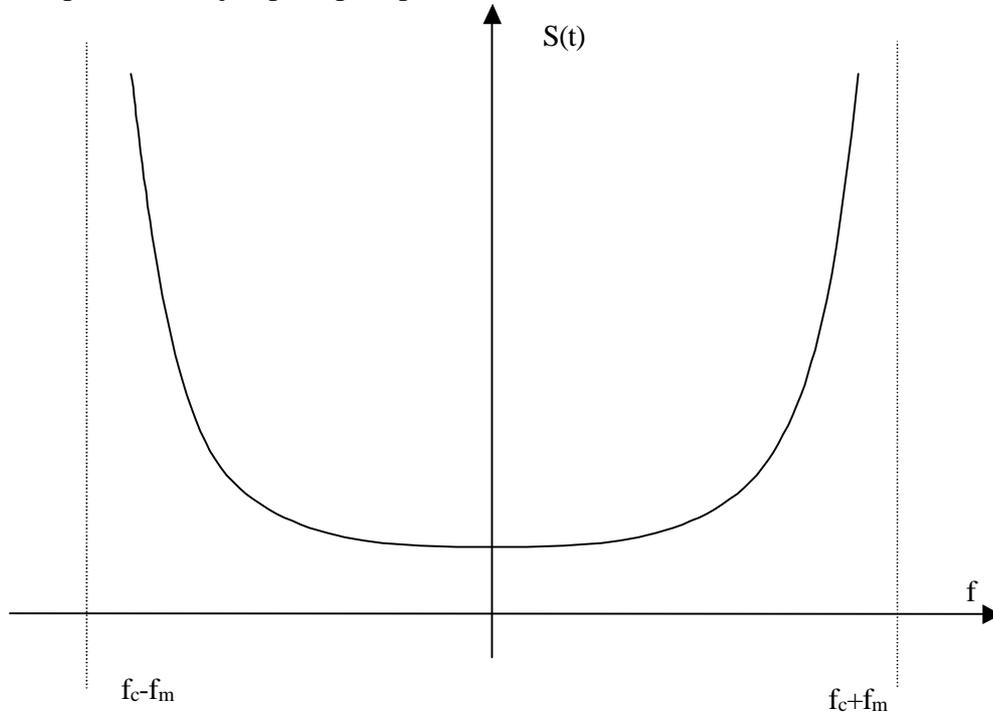
Para la simulación de canales con desvanecimiento se hace necesario una representación matemática de este tipo de canales. Un canal de este tipo puede ser modelado con una estructura del tipo:



Existen dos canales en cuadratura alimentados por sendas fuentes de ruido gaussiano. Las salidas de estas fuentes son aplicadas a filtros que representan el efecto del desplazamiento Doppler que experimenta la señal por el movimiento que pueda mantener el móvil en una transmisión en curso. La forma que tiene este filtro viene por lo tanto determinada por la frecuencia Doppler, la cual a su vez depende de la velocidad del móvil así como de la frecuencia central de transmisión. En el esquema anterior el filtro está centrado en la frecuencia 0 ya que estamos trabajando con un sistema banda base. El móvil se mueve con una velocidad determinada y formando un ángulo α_i con respecto a la señal recibida por el camino de propagación i -ésimo que viene definido por una frecuencia portadora f_c la cual en este caso se ve modificada de la forma $f_c + f_m \cos \alpha_i$, donde $f_m = \frac{v}{\lambda} = \frac{v \cdot f_c}{c}$, v es la velocidad del móvil, $\lambda = \frac{c}{f_c}$ es la longitud de onda de la portadora, y c es la velocidad de la luz. La frecuencia Doppler puede ser tanto positiva como negativa en función de la dirección en la que se este moviendo el móvil, y por lo tanto lo máximo y mínimo que podemos tener de frecuencia Doppler es $\pm f_m$ cuando el móvil se mueva en la dirección en que le llega la señal en un sentido u otro. Este es el caso que se produce cuando la señal se encuentra alineada o encauzada en una calle y el móvil se encuentra trasladándose a través de ella, algo común en áreas urbanas.

Si asumimos que α_i está uniformemente distribuido, la frecuencia Doppler tiene una distribución aleatoria coseno. Además la potencia recibida en el móvil depende la ganancia de potencia de la antena y de la polarización usada. De esta forma la transmisión de una portadora no modulada sería vista en el móvil con un conjunto de

frecuencias centradas en la portadora espaciadas como máximo $\pm f_m$ y con una distribución que depende del entorno, y el patrón de radiación (y como consecuencia de captación) de la antena del móvil. Para la estación base ocurre lo mismo, ya que a pesar de mantenerse fija, puede estar recibiendo señal de un móvil en movimiento, en cuyo caso la señal se ve de igual forma modificada. Existen varias alternativas a la hora de tomar un espectro. Un ejemplo típico puede ser:



El cual viene definido por la fórmula $S(f) = \frac{A}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_m}\right)^2}}$ donde A es una constante.

Si suponemos que el filtro Doppler se encuentra ausente, en ese caso tenemos que $h_I(t)=x(t)$ y $h_Q(t)=y(t)$, y la salida es

$$\tilde{h}(t) = x(t) \cos \mathbf{w}_c t - y(t) \sin \mathbf{w}_c t$$

donde $x(t)$ e $y(t)$ son variables aleatorias independientes y Gaussianas. Esta ecuación puede ser vista como

$$\tilde{h}(t) = R(t) \cos(\mathbf{w}_c t + \mathbf{y}(t))$$

donde

$$R(t) = \left(x^2(t) + y^2(t)\right)^{\frac{1}{2}}$$

esta distribuida Rayleigh, y

$$\mathbf{y}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y(t)}{x(t)} \right)$$

tiene una función de probabilidad uniforme. Hemos obtenido una señal $\tilde{h}(t)$ con envolvente Rayleigh, y con densidad espectral de potencia blanca. Al introducir los filtros Doppler no cambiamos las características estadísticas de la envolvente Rayleigh, pero metemos la correlación necesaria entre las componentes frecuenciales de $\tilde{h}(t)$.

El esquema para generar una señal con desvanecimiento Rayleigh esta compuesto por dos canales en cuadratura. Si quitamos las portadoras nos quedamos con una representación en banda base, lo cual es esencial para simulación por ordenador, ya que la simulación a nivel de portadora de RF hace la simulación impracticable.

La señal $\tilde{h}(t)$ puede ser representada como

$$\tilde{h}(t) = \Re[h(t)e^{j\omega_c t}]$$

donde $h(t)$ es la representación banda base compleja de $\tilde{h}(t)$,

$$h(t) = h_I(t) + j \cdot h_Q(t)$$

2.4.2.2. Canal con desvanecimiento Rician.

Si en la transmisión de la señal radio exista un camino de propagación dominante entre estación base y móvil no podemos hablar de un canal con una característica estadística de desvanecimiento Rayleigh. En este caso tenemos uno de los caminos que predomina de alguna manera sobre los demás. Esto es normal en entornos de propagación móvil reducidos como microcélulas donde el camino dominante bien puede ser una línea de vista. Este camino dominante reduce el efecto de desvanecimiento. Para definir este canal a partir del modelo que nos da la envolvente de un canal Rayleigh debemos definir un parámetro llamado de Rician y que viene definido como

$$K = \frac{\text{potencia_del_camino_dominante}}{\text{potencia_de_los_demás_caminos}}$$

Cuando K es igual a cero la envolvente resultante debe ser Rayleigh, mientras que si k tendiera a infinito el canal seria Gaussiano.

El desvanecimiento y la profundidad de este tiene más posibilidades de darse y con más profundidad cuanto menor sea el valor de K. Esto es importante, ya que cuando el desvanecimiento provoca que la señal se encuentre por debajo del nivel medio del ruido del canal es probable que ocurra un error en la ráfaga. Sin embargo cuando K es grande no es tan probable que ocurra ese mismo error en la ráfaga a pesar de que tenga lugar el mismo desvanecimiento. Esto provoca que para diferentes tipos de canales sea necesario mantener una SNR distinta ya que esos canales están caracterizados por diferentes K. De forma amplia podemos decir que el desvanecimiento Rayleigh caracteriza a celdas grandes, mientras que las microceldas están definidas por desvanecimientos con características Rician, y macroceldas de 2 Km deben mantener un compromiso entre ambas.

FSK:

Rayleigh-> 10^{-3} ->SNR=30dB

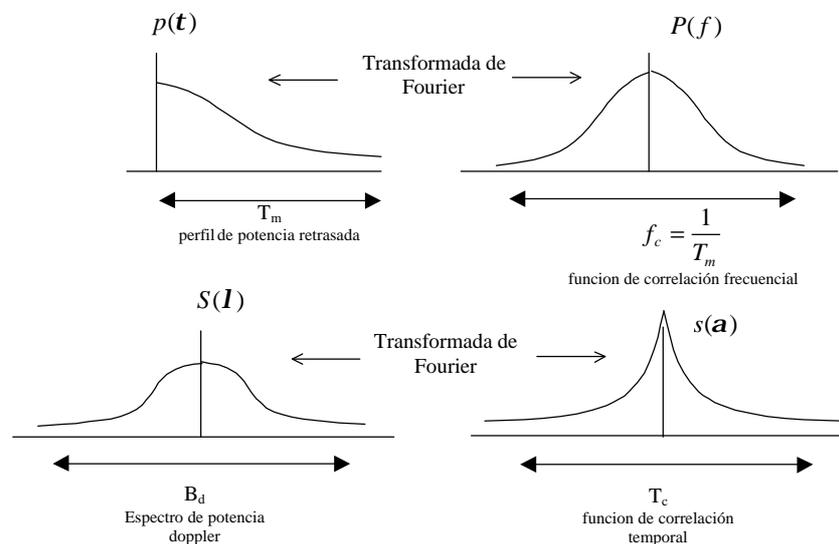
Rician con K elevada-> 10^{-3} ->SNR=11dB

2.4.2.3. Canales de banda ancha.

Hemos mantenido que el efecto de la propagación multicamino es el ensanchamiento de los símbolos recibidos. En canales de banda ancha la tasa de símbolos es lo suficientemente alta como para que cada símbolo al ensancharse se introduzca sobre los símbolos adyacentes produciendo interferencia entre símbolos (ISI). Para que el receptor sea capaz de eliminar la interferencia entre símbolos y recuperarlos correctamente debe determinar la respuesta impulsiva del canal de radio

móvil. Esta respuesta debe ser constantemente calculada ya que el canal cambia continuamente en el tiempo y en el espacio dado que el móvil se encuentra en movimiento al mismo tiempo que el entorno que define el canal se mueve y varia. La estimación del canal es el fin al que se trata llegar con el sondeo del canal. Esto es vital para poder utilizar un ecualizador que nos proporcione una BER aceptable en nuestra señal.

En el caso del sistema GSM podemos apreciar la necesidad de realizar un sondeo del canal. Si el ancho de banda de la señal transmitida es estrecho comparada con el ancho de banda de coherencia del canal B_c , todas las componentes frecuenciales se encuentran con idénticos retrasos de propagación, teniendo en este caso una condición de banda estrecha y enfrentándose la señal a un desvanecimiento de envolvente plano. Cuando el ancho de banda de la señal crece, como es el caso de los sistemas CDMA, el canal resulta ser más dispersivo para la señal lo que provoca interferencia intersímbolo. El ancho de banda del canal B_c es definido como la frecuencia, en la cual la correlación de dos componentes correspondientes a señales recibidas es menor de 0.5. B_c es inversamente proporcional al delay-spread (d) $B_c = 1/2 \cdot \rho \cdot d$. El ancho de banda del canal de propagación es la superposición de un numero de caminos con desvanecimiento dispersivo, experimentando varias atenuaciones y retrasos, agravado por el fenómeno del desplazamiento Doppler provocado a su vez por el movimiento de móvil. el máximo desplazamiento Doppler esta dado por $f_{D_{max}} = v/\lambda_c = v \cdot f_c/c$. Debido a la dualidad tiempo-frecuencia, este fenómeno de dispersión frecuencial, se refleja en un comportamiento selectivo en el tiempo, y un mayor ensanchamiento Doppler así como en una fluctuación más rápida de la respuesta impulsiva temporal.



Existen, tanto para GSM como para otros sistemas, definidos respuestas al impulso que caracterizan diferentes entornos en los cuales se puede establecer una comunicación. Estos canales sirven para testear los diferentes ecualizadores. Con estas respuestas impulsivas el canal es simulado con los correspondientes retrasos y sus respectivos pesos. En cada una de estas componentes individuales es asumido una distribución de la amplitud Rayleigh. En el caso de que pudiera existir alguna

componente que tuviera camino directo, el caso de entornos rurales, la componente perteneciente al tap 0 debería tener una distribución Rician.

Si queremos en definitiva tener comunicaciones fiables debemos a partir del conocimiento del canal de propagación móvil poder eliminar la interferencia introducida tanto por el canal como la provocada por el modulador. La BER es minimizada si utilizamos Estimador de Secuencia de Máxima Probabilidad "Maximum Likelihood Sequence Estimator" (MLSE). El algoritmo de Viterbi es un método MLSE eficientemente implementado y que por lo tanto es usado actualmente en GSM.