

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones



Ingeniería de Telecomunicación

Resumen del Proyecto Fin de Carrera

Uso de Códigos Convolucionales en Redes Colaborativas

Autor: RAFAEL CABALLERO ZARAGOZA

Director: REZA SOLEYMANI

Cotutora: MARÍA JULIA FERNÁNDEZ-GETINO GARCÍA

Uso de Códigos Convolutivos en Redes Colaborativas

Resumen del Proyecto Fin de Carrera

*Ingeniería de Telecomunicación,
Dept. of Electrical and Computer Engineering
at Concordia University*

por **Rafael Caballero Zaragoza**

Director: Professor Reza Soleymani

Concordia University

Montreal (Canadá), 20 Julio de 2009

Resumen

El objetivo básico de este proyecto fin de carrera ha sido el estudio de algunos temas dentro de las líneas de investigación llevadas a cabo por el profesor Soleymani y su grupo de estudiantes de doctorado, en la universidad de Concordia, durante mi estancia en dicha universidad.

Se decidió empezar por lo más básico, la simulación de un entorno inalámbrico (*Wireless*) al que añadimos una codificación de canal en forma de código convolucional con decodificación Viterbi. Una vez implementado este escenario, se ha añadido el estudio de las redes colaborativas mediante las referencias bibliográficas recomendadas y ciertas simulaciones en Matlab.

El objetivo principal de este trabajo ha sido la implementación y uso del código convolucional aplicado a un entorno colaborativo. Para ello, la primera parte del trabajo ha consistido en la realización de un código convolucional que ha sido estudiado y probado para, a continuación, ser aplicado en redes colaborativas con nodos ayudando en la transmisión de la información.

Se ha comprobado, a través de una serie de simulaciones en Matlab, que el uso de nodos auxiliares mejora las prestaciones de los distintos sistemas propuestos y sería algo recomendable de implementar en ciertas aplicaciones prácticas.

Índice

1. Presentación	1
2. Introducción	2
1.1. Propósito.....	2
1.2. Método.....	2
1.3. Estructura del estudio.....	2
3. Descripción del escenario	4
2.1. Generación de la información.....	4
2.2. Codificador convolucional.....	4
2.3. Modulador BPSK.....	5
2.4. Canal AWGN.....	6
2.5. Algoritmo de Viterbi.....	6
4. Desvanecimiento en canales radio	8
3.1. Tipos de desvanecimiento.....	8
3.2. Desvanecimiento a pequeña escala: categorías y efecto.....	8
3.2.1. Dispersión temporal del canal.....	9
3.2.2. Variación temporal del canal.....	9
5. Redes colaborativas	10
4.1. Suposiciones básicas.....	10
4.2. Comunicación en dos fases.....	11
4.2.1. Detectar y reenviar.....	12
4.2.2. Métodos de colaboración con diversidad completa.....	13
6. Resultados	14
5.1. Canales AWGN.....	14
5.2. Canales AWGN con desvanecimiento Rayleigh.....	14
5.3. Canales AWGN con desvanecimiento Rayleigh y colaboración.....	15
7. Conclusiones	16

1. Presentación

Este documento, constituye el resumen en castellano del proyecto '*Use of Convolutional Codes for Collaborative Networks*' que fue realizado durante mi estancia en la Universidad de Concordia en Montreal (Canadá), gracias a la concesión de una beca Bancaja de convenio bilateral por parte de la Universidad Carlos III de Madrid.

La tutora de este proyecto en la Universidad de origen ha sido D. ^a María Julia Fernández-Getino García del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones.

El tutor del proyecto en la Universidad de destino, *Concordia University*, ha sido el profesor Reza Soleymani del '*Wireless and Satellite Communications Group*' el cual pertenece al '*Department of Electrical and Computer Engineering*' de esa Universidad.

Para la realización de este proyecto, se ha seguido la línea de investigación llevada a cabo por el profesor Soleymani y su grupo de alumnos de doctorado estando supervisado por ellos durante todo su desarrollo.

2. Introducción

Los códigos convolucionales junto con el algoritmo de Viterbi para su posterior decodificación son técnicas de corrección de errores ampliamente extendidas para mejorar la probabilidad de error de bit (BER) en los sistemas de comunicaciones. Sin embargo, llega un momento en que no podremos mejorar las prestaciones de nuestro sistema de comunicaciones simplemente usando codificación de canal debido a las características de los canales.

Para solucionar o mejorar dichas prestaciones, se utilizarán redes colaborativas sacando provecho de un mayor grado de diversidad cuando usamos la ayuda de otros nodos dentro de nuestra misma red.

Propósito

El objetivo fundamental de este proyecto era el diseño de un entorno colaborativo para estudiar las ventajas de la aplicación de estas técnicas en términos de una mejora de las prestaciones de nuestro sistema de comunicaciones inalámbrico.

Para llevar a cabo este propósito, se ha ido por partes, la primera de ellas y la más laboriosa ha sido la implementación del codificador convolucional con el decodificador Viterbi. Una vez realizada esta parte, se ha añadido un nodo a la red que ayudará al emisor a obtener mejores prestaciones.

El verdadero propósito de este trabajo es la comprobación de la mejora de las prestaciones del sistema cuando añadimos colaboración. Para ello, se han consultado distintas referencias bibliográficas recomendadas que han ayudado a familiarizarse con el tema.

Método

Para la realización de este trabajo se ha elegido un entorno Matlab, básicamente por su facilidad de uso. Las simulaciones realizadas no han durado excesivamente con lo que se ha podido usar este software sin problema. Posteriores estudios más en profundidad sobre este tema, requerirían una implementación en C o C++ que proporcionase un entorno de simulación más rápido.

Estructura de la memoria

El trabajo original se ha estructurado en secciones en las que se han ido estudiando las diferentes etapas abordadas.

En un primer capítulo, se ha presentado el sistema de comunicaciones vía radio (*Wireless*) simplificado, seguido de una introducción a los códigos convolucionales y al algoritmo de Viterbi de decodificación.

A continuación, se ha dedicado una sección al estudio de los diferentes modelos de atenuación multitrayecto que podemos tener en un entorno de comunicaciones inalámbricas ya que debemos incluir su efecto en nuestras simulaciones.

En la siguiente sección, se ha pasado a introducir los conceptos referentes a las redes colaborativas y sus implicaciones derivadas del estudio de las referencias bibliográficas recomendadas.

Por último, se ha dedicado una sección a la recopilación de los resultados obtenidos en todas las simulaciones llevadas a cabo con distintos parámetros y distintos escenarios. Desde el más básico en el que no hemos introducido atenuación por multitrayecto hasta los entornos colaborativos en los que hemos situado el nodo auxiliar en distintas posiciones.

Finalmente, en la última sección, se incluyen las conclusiones más relevantes del trabajo.

3. Descripción del escenario

En un principio, no se tendrá en cuenta el tema de las redes colaborativas para centrarse en la implementación de un código convolucional con decodificación mediante el algoritmo de Viterbi. Se va a simplificar el sistema, suponiendo que se dispone de un escenario en donde sólo influye el ruido aditivo, blanco y gaussiano (AWGN) con una modulación *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) básica. Posteriormente, se incluirá el efecto provocado por el desvanecimiento o atenuación multitrayecto para comparar ambos escenarios.

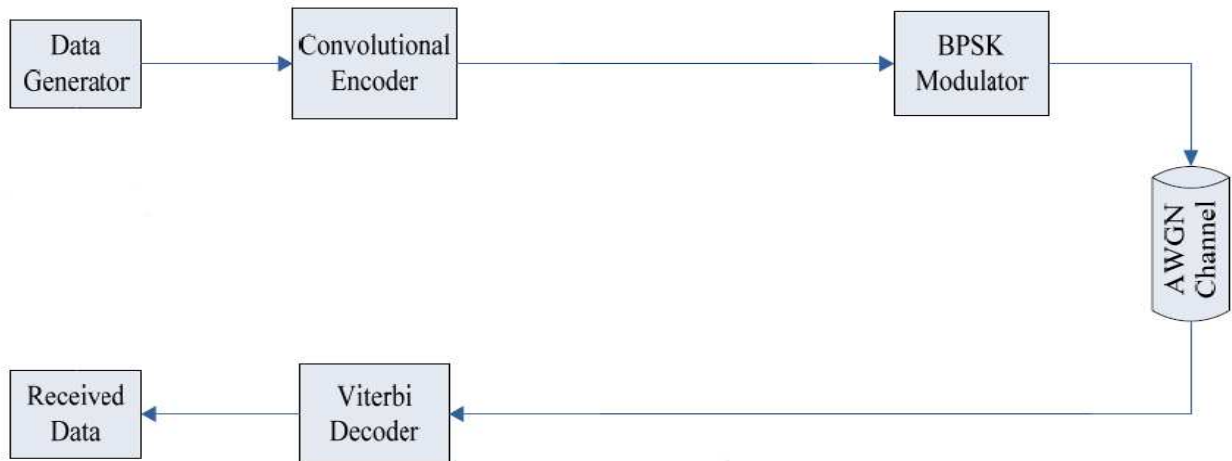


Figura 2.1: Resumen del sistema

Como se puede apreciar, el esquema de la Figura 2.1 está muy simplificado ya que se podrían añadir muchos otros bloques. En este caso, sólo se tiene en cuenta la codificación de canal.

Se puede valorar, en rasgos generales, la utilidad de cada bloque. Dado que éste es un resumen del proyecto general, para explicaciones más detalladas, remitirse a dicho proyecto.

Generación de la información

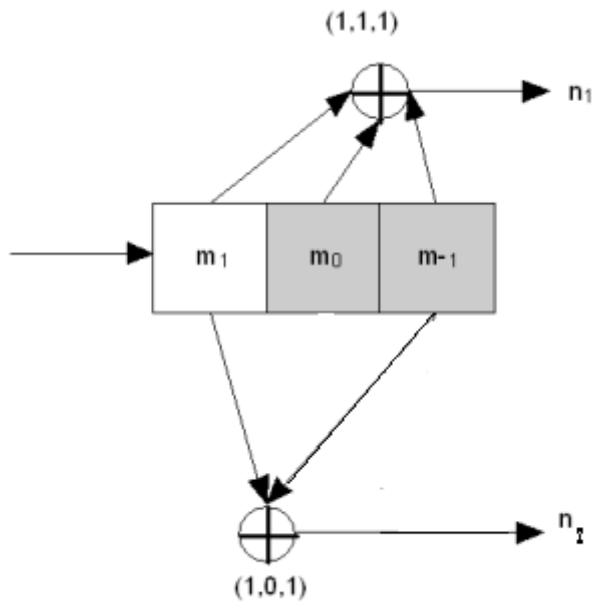
Usamos la función *rand* de Matlab para generar un cierto número de bits de forma aleatoria que representarán nuestro mensaje o información. Esta información será codificada y transmitida a través del canal.

Codificador convolucional

Esta codificación de canal es usada para sistemas que necesitan buenas prestaciones con un coste de implementación bajo. Para este trabajo, se ha diseñado uno de los códigos convolucionales más simples, un código de tasa $r=1/2$ y con una longitud de memoria de $M=2$.

Para definir un código convolucional, se dispone de una terna de parámetros (n,k,L) , donde n es el número de salidas del sistema codificador, k es el número de bits que

introducimos a la entrada al mismo tiempo y L es el numero de celdas de memoria mas la entrada. En este caso, se ha usado un código convolucional $(2,1,3)$.



También se puede definir el código convolucional mediante la matriz generadora que define todas las conexiones entre celdas. Para el caso que se ha aplicado, dicha matriz generadora sería:

$$G = \begin{bmatrix} 111 \\ 101 \end{bmatrix}$$

Como se puede observar en la Figura 2.2, se tienen tantas filas como salidas y tantas columnas como unidades de memoria (contando con la entrada).

Figura 2.2: Codificador convolucional

La característica más importante a destacar de los códigos convolucionales es la dependencia que tiene la salida de la entrada en instantes anteriores y no sólo de la entrada en ese mismo instante. Este hecho es lo que le da a los códigos convolucionales esa capacidad para corregir errores tan potente.

Otra característica importante del codificador, es que debe empezar y concluir en un estado conocido para que sea posible aplicar el algoritmo de Viterbi en decodificación y se pueda reconstruir la información a la entrada de manera adecuada.

Modulador BPSK

Es el tipo de modulación más simple que se puede implementar en un sistema de comunicaciones. Cada símbolo vendrá representado por un único bit. Los dos puntos de la constelación están situados sobre el eje real y separados en fase 180° .

La información binaria es transmitida mediante las dos siguientes señales para el '0' y el '1' binario respectivamente.

$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t)$$

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi)$$

Siendo E_b la energía de bit, T_b el tiempo de bit y f_c la frecuencia de portadora.

Canal AWGN

Si se quiere simular un canal de comunicaciones se ha de añadir el ruido aditivo blanco y gaussiano (AWGN). Añadir ruido a los símbolos producidos por el codificador convolucional, implica generar una serie de números aleatorios que sigan un patrón gaussiano y que estén escalados de acuerdo a la energía por símbolo (E_s) deseada.

Si se tiene un sistema de comunicaciones sin codificación, la energía por símbolo es igual a la energía por bit ($E_s=E_b$) dado que hay un símbolo por bit. En este caso y dado que se está aplicando una codificación de canal, se debe tener en cuenta el hecho de que se está compartiendo la energía entre todos los bits codificados. Para simplificar, se utiliza la energía por símbolo o energía por palabra codificada.

Como ejemplo, se considera el sistema con el que estamos trabajando en el que se tiene una tasa de codificación de $r=1/2$. En este caso, $E_s \neq E_b$ con lo que para obtener la relación E_s/N_0 debemos de aplicar lo siguiente:

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log_{10}(k/n) = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log_{10}(1/2)$$

Considerando únicamente la existencia de ruido AWGN, la señal que se recibirá en el receptor será $r(t) = s(t) + n(t)$.

Algoritmo de Viterbi

Esta ha sido la parte que más tiempo ha llevado completar, básicamente por su complejidad de implementación para realizar simulaciones. A continuación, se explican los conceptos básicos referentes a este algoritmo pero, para un mayor detalle de explicación, remitirse a la memoria original en inglés.

El algoritmo de Viterbi se basa en el diagrama de Trellis que es un diagrama en forma de red que tiene tantas filas o líneas horizontales como estados tiene el codificador y tantas líneas verticales como bits tiene nuestro mensaje, incluyendo el estado inicial ($t=0$) y los bits necesarios para limpiar el codificador y hacer que termine en un estado conocido.

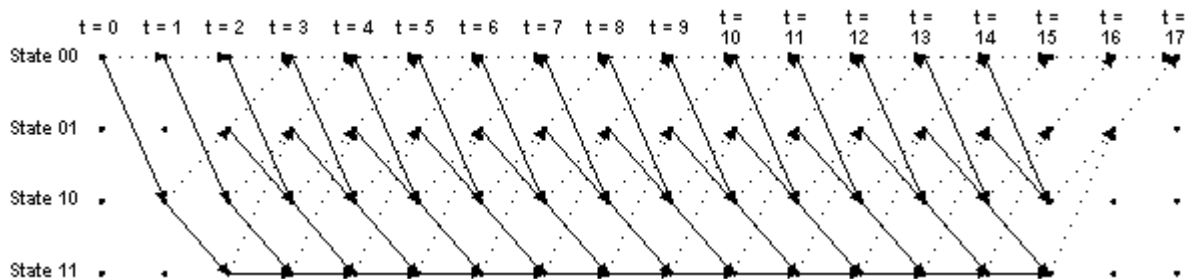


Figura 2.3: Diagrama de Trellis para un codificador convolucional de tasa $r=1/2$ y $M=2$ para un mensaje de 15 bits

En este caso, como vemos en la Figura 2.3, se dispone de dos celdas de memoria ($M=2$), lo que significa que se tienen cuatro estados de memoria distintos. En cuanto al número

de columnas, se requiere una para el estado inicial a lo que hay que añadir las columnas correspondientes a los 15 bits del mensaje más los dos bits añadidos para hacer que el codificador acabe en un estado conocido. Para el ejemplo implementado, se dispondrá de 18 columnas, empezando en el estado $t=0$.

Las líneas continuas que conectan los distintos puntos en el diagrama, representan la transición entre estados cuando la entrada es '1' mientras que las líneas discontinuas indican que la entrada es un '0'.

Al igual que se ha comentado para el caso del codificador convolucional, tanto el estado inicial como el final del diagrama de Trellis deben ser el estado '00' para que podamos aplicar el algoritmo de decodificación de Viterbi. Para todo mensaje, se añaden M bits a la entrada, todos a '0' que servirán para limpiar el codificador y hacer que acabe en el estado que queremos.

El funcionamiento básico del algoritmo de Viterbi se basa en la comparación entre el símbolo recibido y los distintos símbolos que se pueden recibir. Dependiendo si la decodificación es blanda o dura, se aplicarán distancias Euclídea o Hamming respectivamente para el cálculo de errores.

Se tomará como ejemplo el caso de la transición entre el estado inicial ($t=0$) y $t=1$ teniendo decodificación dura. Estando en el estado '00' sólo tenemos la posibilidad de haber recibido dos posibles símbolos, '00' ó '11' dado que sólo tenemos un bit a la entrada del codificador. Se va guardando el error acumulado para cada rama que se irá sumando en posteriores transiciones.

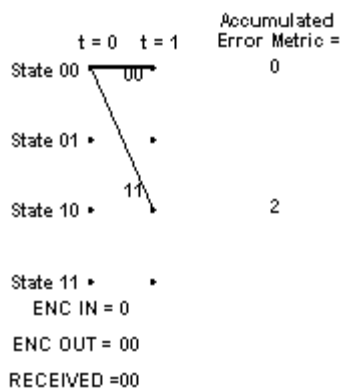


Figura 2.4: Resultado en $t=1$

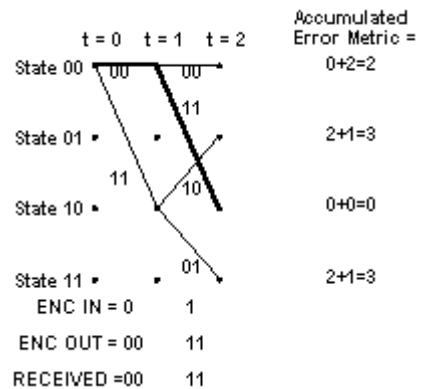


Figura 2.5: Resultado en $t=2$

Una vez se ha llegado al final del Trellis, se puede aplicar el método de decodificación, para generar la salida del decodificador a partir del camino óptimo en cuanto a métrica se refiere. Después de todo el proceso, se debería tener la misma secuencia de bits que fueron codificados en un principio, descartando los M últimos bits que sirvieron para limpiar el codificador y hacer que éste acabase en un estado conocido.

4. Desvanecimiento en canales radio

El canal radio es el que genera el mayor número de limitaciones en las comunicaciones inalámbricas. Puede haber diferentes tipos de canales que además, generalmente, cambian con el tiempo. Hasta ahora, sólo se había tenido en cuenta el ruido aditivo, blanco y gaussiano (AWGN) modelando el ruido térmico en los componentes del receptor así como la temperatura de antena. En un canal radio más aproximado a la realidad, este modelo no es completo debido, básicamente, a la aleatoriedad de estos canales de propagación.

Estos cambios aleatorios causan variaciones en la amplitud, fase o frecuencia de la señal emitida y son englobados en lo que se conoce como *'fading'* o desvanecimiento.

Otra forma de desvanecimiento es el multitrayecto de las ondas viajando por un medio inalámbrico, lo que llamamos atenuación multitrayecto.

Tipos de desvanecimiento

El modelo de canal se basa en la distancia del enlace entre emisor y receptor. Se dan dos tipos de modelo, uno sería el desvanecimiento a gran escala que es un modelo basado en grandes distancias y otro el desvanecimiento en pequeña escala, modelo basado en rápidos cambios en la señal en periodos cortos de tiempo y sobre enlaces reducidos. Para este trabajo, se ha tomado como modelo básico en las simulaciones, el desvanecimiento en pequeña escala por lo será en el que más atención se ponga. En la Figura 3.1 se puede observar una clasificación de los distintos tipos de desvanecimiento.

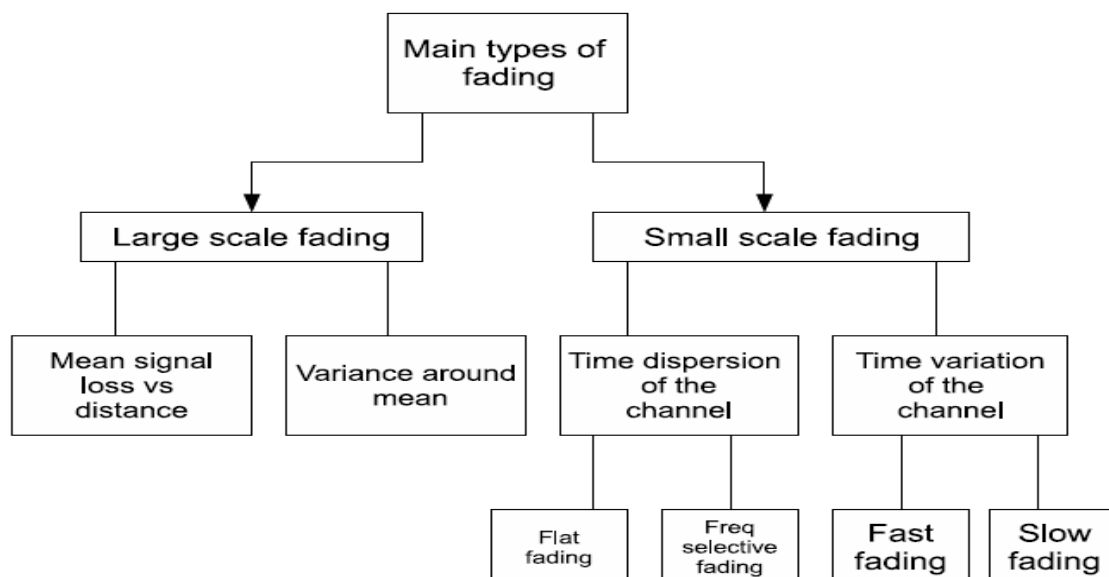


Figura 3.1: Tipos de desvanecimiento en canales radio

Desvanecimiento a pequeña escala: categorías y efectos

El desvanecimiento a pequeña escala debido al multitrayecto es lo que más interesa simular en entornos inalámbricos. Se pueden hacer dos clasificaciones generales, atendiendo a la dependencia frecuencial o a la variación temporal.

Dispersión temporal del canal

La dispersión temporal del canal puede medirse viendo la llegada de las distintas componentes de una misma señal enviada. Es posible medir el tiempo entre que se recibe la primera y la última muestra de nuestra señal, el cual se puede definir como retardo máximo del canal (T_m). Comparando este retardo con el tiempo de símbolo (T_s), se pueden tener dos posibles casos en los que la señal se verá distorsionada y de acuerdo a ello, se dispone de dos tipos de desvanecimiento:

-Desvanecimiento selectivo en frecuencia: ocurre cuando T_m es mayor que T_s , en cuyo caso hay componentes de la señal que están llegando más allá del tiempo de símbolo con lo que aparece una interferencia intersimbólica (ISI). Se pueden dar diferentes grados de atenuación o desvanecimiento atendiendo a la frecuencia usada para la transmisión en cada caso.

-Desvanecimiento plano: en este otro caso, $T_m < T_s$, lo que significa que todas las componentes multitrayecto de la señal llegan dentro del tiempo de símbolo con lo que no existe una perturbación para el símbolo siguiente. Lo que sí puede suceder, al igual que en el otro caso, es que las componentes se sumen de manera destructiva con lo que se darán variaciones en la relación señal a ruido (SNR) de la señal recibida.

Variación temporal del canal

Un canal puede variar con el tiempo debido a la movilidad relativa entre un emisor y un receptor o debido a la movilidad de los objetos existentes en el propio canal aunque los participantes en la comunicación no se muevan. Debido a estas variaciones en el canal, la amplitud y la fase del canal se verán modificadas continuamente. Se establece una constante T_0 que definimos como el tiempo en el que el canal permanece constante y que podemos comparar con el tiempo de símbolo para obtener una nueva clasificación:

-Desvanecimiento rápido: caso en el que $T_s > T_0$, con lo que tenemos un comportamiento distinto del canal para cada símbolo enviado. Sin embargo, no es éste un caso muy realista además de tener un comportamiento muy complicado de simular.

-Desvanecimiento lento: caso contrario en el que $T_s < T_0$, lo que significa que el canal permanece constante, al menos durante la emisión de un símbolo. Se puede extrapolar la idea y suponer, por ejemplo, que el canal permanece constante durante un mayor periodo de tiempo.

Para la simulación de estos fenómenos de atenuación multitrayecto y desvanecimiento se necesita un modelo estadístico. Se puede suponer que tenemos un gran número de señales, debido al multitrayecto, que contribuyen a la señal en recepción. Este hecho hace que sea aplicable el teorema central del límite que implica que la respuesta al impulso del canal siga un proceso gaussiano. Si el proceso tiene media cero, que es el caso del modelo de desvanecimiento de Rayleigh, la amplitud de la respuesta del canal en cualquier instante de tiempo, tiene una distribución de probabilidades Rayleigh y una distribución uniforme para la fase.

Para el caso estudiado, sólo habrá que preocuparse de la amplitud del modelo de desvanecimiento ya que no es necesario tener en cuenta la fase cuando tenemos una modulación BPSK, dado que se puede cambiar el eje en recepción y una variación en la fase no cambiará los resultados.

5. Redes colaborativas

A partir de este punto, se comienza a introducir el concepto de redes colaborativas que era básicamente el objetivo de este proyecto. Se añadirá a la codificación de canal implementada a través del codificador convolucional, la posibilidad de colaboración entre distintos nodos de una misma red para la obtención de una mejora en las prestaciones.

La idea básica es la posibilidad de aumentar la diversidad espacial del sistema de comunicaciones. Para ello, una primera opción es diversificar el número de antenas en los dispositivos emisores y receptores, lo que se conoce por comunicaciones ‘*Multiple Input Multiple Output*’ (MIMO). Estas técnicas están estudiadas y aplicadas en determinados terminales pero tienen una viabilidad limitada debido a la necesaria portabilidad de algunos terminales inalámbricos que nos limitan el número de antenas a instalar en un mismo dispositivo.

Ante esta situación, se ha pensado en la posibilidad de utilización de otros terminales presentes en nuestra misma red de comunicaciones que, en un momento dado, no estén trabajando, para hacerlos partícipes del envío de información a un determinado receptor ayudando al emisor. En este nuevo escenario, se aumenta el grado de diversidad de nuestro sistema, ya que existe una mayor variedad de canales de envío, mejorando las prestaciones globales del mismo.

El hecho de introducir colaboración por parte de otros nodos en la red tiene como fin la creación de otros canales de comunicaciones que tengan un coeficiente de desvanecimiento distinto al del canal entre emisor y receptor con lo que aumentamos el grado de diversidad de nuestro sistema.

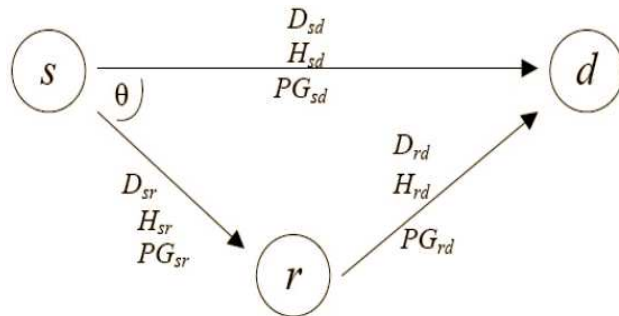


Figura 4.1: Escenario de colaboración inalámbrica

Suposiciones básicas

Una vez presentada la idea, se ha elegido trabajar con el escenario colaborativo más simple que podíamos tener, con el emisor y el receptor ayudados por un único nodo auxiliar tal como se observa en la Figura 4.1. La codificación de canal aplicada será la misma que anteriormente cuando teníamos un emisor y un receptor. El nodo auxiliar hará las veces de una nueva fuente de envío de la misma información.

Se han de definir una serie de parámetros, que representan las características del sistema, para realizar las simulaciones posteriores. Se dispone de tres variables distintas para cada enlace o canal, D_{ij} , H_{ij} y PG_{ij} , que definen la distancia entre nodos, el coeficiente de desvanecimiento y el coeficiente de pérdidas del canal respectivamente. Se establecen el coeficiente de pérdidas y la distancia entre emisor y receptor a 1 ($PG_{sd}=D_{sd}=1$) y se define el resto de parámetros de manera relativa a estos dos mediante las siguientes igualdades:

$$PG_{ij} = PG_{sd} \left(\frac{D_{sd}}{D_{ij}} \right)^\alpha$$

Se suponen coeficientes de pérdidas cuadráticos ($\alpha=2$) para todos los resultados y que la distancia entre emisor y nodo auxiliar es siempre mayor que 0, dado que si fuese 0 sería como tener un modelo de sistema *MIMO* de múltiples antenas en transmisión.

El modelo de desvanecimiento que aplicado será el de pequeña escala por multitrayecto. Se suponen conocidos los coeficientes de desvanecimiento en recepción (aplicándose a cada caso, receptor o nodo auxiliar que también actúa como receptor en la fase de escucha de la información proveniente del emisor). Estos coeficientes seguirán un modelo Rayleigh, muestras independientes de una variable aleatoria gaussiana compleja con media 0 y varianza 0.5.

Cuando se aplicaba un modelo de canal únicamente afectado por el ruido blanco y gaussiano, no se tenía en cuenta la influencia del desvanecimiento a gran escala ya que se suponía igual a 1 pero ahora sí se tendrá en cuenta mediante la siguiente relación:

$$G_{ij} = \sqrt{PG_{ij}} H_{ij}$$

Vemos que tenemos en cuenta tanto el coeficiente de pérdidas (PG_{ij}) como el coeficiente de desvanecimiento definido (H_{ij})

Un último dato a tener en cuenta, en las suposiciones básicas realizadas, es el desconocimiento por parte del emisor de la ayuda que está recibiendo por parte del nodo auxiliar, además de no saber cual es el comportamiento del canal en cada caso.

Comunicación en dos fases

La idea de las redes colaborativas es tener al emisor y a los nodos auxiliares trabajando a la misma frecuencia pero, en ese caso, será imposible para dichos nodos, transmitir y recibir al mismo tiempo ya que una señal recibida, muy atenuada por el efecto del canal, será imposible de reconocer si estamos transmitiendo otra sobre la misma frecuencia de mucha mayor potencia. Si se quisiera usar otra frecuencia para poder transmitir al mismo tiempo que se recibe, se estaría empleando un mayor ancho de banda lo cual no sería una situación deseable, incluso a veces, inviable.

Una vez planteada esta situación, se observa que los nodos auxiliares tienen dos fases a completar que no pueden realizar al mismo tiempo, es decir fases en la comunicación: una primera fase de escucha de la señal proveniente del emisor (fase de escucha) y una segunda de envío de la propia señal al receptor (fase de colaboración). De esta manera, se puede enviar y recibir sobre una misma frecuencia pero se debe incrementar la tasa binaria de envío del transmisor para que la misma información sea enviada en un periodo de tiempo más breve, para que, realmente, el nodo auxiliar pueda colaborar.

Si el emisor transmite a una velocidad de bit mayor, habrá un tiempo en el que podrá o no enviar información, tiempo en el que antes estaba enviando su información y en el que ahora se tiene al nodo auxiliar en su fase de colaboración. Esa información transmitida vendrá en forma de redundancia.

En un principio, se supondrán ambas fases de la misma duración. Lo que sí se debe tener en cuenta es que, si el periodo de colaboración es menor que el periodo de escucha, cierta información podría no ser enviada a través del nodo auxiliar con lo que no tendríamos una situación de diversidad absoluta.

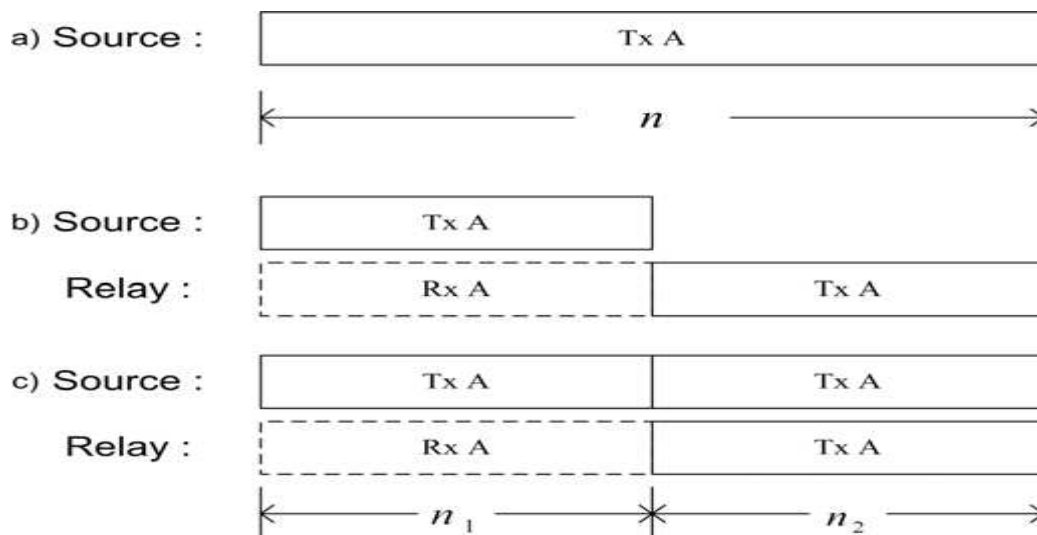


Figura 4.2: a) Transmisión directa, b) Colaboración con el emisor en silencio en la segunda fase, c) Colaboración con el emisor transmitiendo en la segunda fase

En el caso c) se está enviando una mayor información en forma de redundancia dado que el emisor está transmitiendo también en la fase de colaboración. Se puede realizar, sin embargo, una comparación válida entre ambos casos, b) y c) si se transmiten los bits en el caso b) con una mayor potencia de señal. Como ejemplo ilustrativo de esta idea, decir que si recibimos un bit de información tres veces, tendremos una probabilidad de equivocarnos, en ese bit, menor que si lo recibimos dos veces. Sin embargo, si estos dos bits recibidos fueron transmitidos con una mayor potencia, será menos probable que lleguen con error. Como consecuencia de este fenómeno, siempre se podría realizar hacer una comparación justa entre ambos casos.

A continuación, se explicarán, a grandes rasgos, algunos de los métodos de comunicación en dos fases que se pueden dar para los nodos auxiliares en redes colaborativas.

Detectar y reenviar

Este fue el primer método propuesto cuando se empezó a hablar de comunicación en dos fases. En la primera de ellas, el nodo auxiliar escucha lo que está enviando el emisor y en la segunda, retransmite la información escuchada.

El problema es que no se obtiene diversidad absoluta para todos los símbolos enviados ya que, en un principio, la tasa de envío por parte del emisor no cambia y sólo una parte de la información transmitida por el emisor puede ser retransmitida por el nodo auxiliar. El nodo auxiliar sólo es capaz de transmitir la primera parte de la información proveniente del emisor ya que, necesitamos un tiempo de escucha en el que dicho nodo no está transmitiendo nada.

El otro inconveniente de este método es el hecho de que se retransmite la información que nos llega del emisor sin codificación alguna. El problema que puede surgir, es que el canal entre emisor y nodo auxiliar sea muy pobre y lo que se reciba en dicho nodo no sean más que errores que se enviarán de nuevo al receptor. Este hecho puede hacer que las prestaciones del sistema completo sean incluso peores que cuando no tenemos colaboración.

Métodos de colaboración con diversidad completa

Como ya se ha comentado, una de las características más importantes de las comunicaciones colaborativas es el hecho de obtener un mayor grado de diversidad completa para todos los bits de información enviados por el emisor. Para ello, se han desarrollado algunos métodos en los que se supondrá que el emisor no transmite en la fase en la que el nodo auxiliar esta colaborando.

Amplificar y reenviar

Es un método simple para obtener colaboración, por parte de un nodo auxiliar, en el que se tiene una primera fase, en la que dicho nodo está escuchando lo que envía el emisor y una segunda en la que, simplemente, amplifica lo que le ha llegado. Hay que tener en cuenta que el nodo auxiliar amplifica no sólo la señal que le llega del emisor si no también el ruido existente en el canal emisor-nodo auxiliar. Al igual que se vio para el método anterior, puede darse el caso de que este canal sea muy malo con lo que se estarán amplificando errores en su mayoría.

En un principio, se supondrán las fases de escucha y colaboración de la misma duración con lo que se estará consiguiendo un mayor grado de diversidad para toda la información enviada por el emisor. El receptor está recibiendo dos copias de la señal a través de dos canales distintos que tienen distintas propiedades con lo que, en general, las prestaciones serán mejores.

Decodificar y reenviar

Este es un método más completo, en el que el nodo auxiliar realiza un proceso de decodificación de la información, que evita el problema que se presentaba con el método anterior de envío de errores. Es un método más robusto pero implica una mayor complejidad en el diseño de los nodos auxiliares y una mayor carga de trabajo para dichos nodos.

El método de codificación de la información en el nodo auxiliar puede ser el mismo o no que en el emisor. En recepción, se debe tener algún mecanismo para saber el método de codificación, tanto en el emisor, como en los nodos auxiliares de los que también se esté recibiendo información.

El nodo auxiliar, dependiendo de la BER para un cierto nivel de SNR, será o no capaz de realizar el proceso de decodificación. Se define un umbral de BER en dicho nodo por encima del cual, no se podrá llevar a cabo el proceso de decodificación de la información proveniente del emisor con lo que el nodo auxiliar no colaborará.

6. Resultados

En este apartado, se realizará un resumen de los distintos resultados obtenidos en las simulaciones realizadas. Para una explicación más detallada de los resultados y las gráficas obtenidas, habría que remitirse a la memoria en inglés.

Para todas las simulaciones realizadas, se ha seguido el mismo proceso. Se han generado bloques de bits de distintos tamaños y una vez codificados se han enviado a través del canal. En recepción, se ha aplicado el método de decodificación y se han comparado ambos bloques para ver si había o no algún error. El proceso se repite hasta que se tiene un número determinado de bloques en error (100 por ejemplo) o hasta que se han enviado una serie de bloques (10^7 por ejemplo), para distintos valores de *SNR* (desde 0 hasta 15dB por ejemplo).

Canales AWGN

En un principio, se han realizado unas simulaciones del sistema AWGN sin desvanecimiento ni colaboración para comprobar el buen funcionamiento del código convolucional junto con el algoritmo de Viterbi de decodificación. Para estas simulaciones se querían comparar las prestaciones de un código convolucional con las prestaciones de un código bloque. Por ello, se ha implementado un código Hamming decodificado mediante el método Belief Propagation.

Una vez realizada la simulación, se ha comprobado la mejora de prestaciones del código convolucional con respecto al código Hamming y a un sistema en el que se disponía de codificación alguna para valores de *SNR* a partir de 1dB. Para un mismo valor de BER, de 10^{-5} por ejemplo, se aprecia un ahorro de potencia de más de 3dB utilizando un código convolucional con respecto a un código bloque como es el código Hamming. Esto supone, obtener las mismas prestaciones usando la mitad de potencia.

Canales AWGN con desvanecimiento Rayleigh

Una vez simulado el sistema AWGN, se añadirá el desvanecimiento que sigue un modelo Rayleigh. Se va a comprobar cómo afectan al sistema estos fenómenos de atenuación multitrayecto tanto lentos como rápidos.

Para un desvanecimiento lento, todos los bits de un bloque son enviados bajo las mismas condiciones, el canal no cambia durante un periodo de tiempo (en este caso cambia de un bloque al siguiente).

Se han realizado una serie de simulaciones, con distintos tamaños de bloque para comprobar que las prestaciones del sistema son peores cuando se tiene codificación de canal que cuando no existe codificación alguna. Este hecho es, de alguna manera, comprensible debido a que el poder de corrección de errores del código convolucional es inservible cuando todos los bits de un bloque sufren la misma atenuación multitrayecto. El código no es capaz de recuperarse ante posibles errores y dado que el canal será, por lo general, bastante malo, la mayoría de los bits llegarán en error.

En el caso en el que se tiene un desvanecimiento rápido, las prestaciones del sistema con codificación cambian notablemente. En este caso, se han simulado distintas situaciones, la

más extrema es aquella en la que cada uno de los bits que forman el bloque sufre una atenuación por multitrayecto distinta lo que quiere decir que el canal es distinto para cada símbolo enviado.

En este caso, existe una posible recuperación ante un bit erróneo con el siguiente ya que no todos los bits atraviesan canales malos lo que posibilita que la aplicación de la codificación de canal sea efectiva. Se han realizado simulaciones para los casos en los que se dispone de tres y cinco coeficientes de atenuación distintos para un mismo bloque comprobándose que, cuanto menor es el número de coeficientes de atenuación multitrayecto, peores son las prestaciones del sistema ya que más nos acercamos al caso de tener un único coeficiente para todo el bloque (caso de desvanecimiento lento).

Canales AWGN con desvanecimiento Rayleigh y colaboración

Para este apartado se han realizado distintas simulaciones añadiendo un nodo auxiliar al sistema diseñado desde un principio para observar la mejora de prestaciones obtenida. Hay que tener en cuenta que, hasta ahora, todos los sistemas simulados no tenían colaboración por lo que, a la hora de realizar simulaciones, se compararán las prestaciones de esos sistemas con aquellos en los que sí exista colaboración.

Se aplicará el método de decodificar y reenviar que ya se explicó en su momento. En un principio, se supondrá perfecta la decodificación por parte del nodo auxiliar con lo que no se estarán mandando errores desde dicho nodo. También se podrían realizar simulaciones llevando a cabo el proceso de decodificación y posterior codificación en el propio nodo auxiliar aplicando el mismo codificador convolucional implementado en el emisor.

Las distintas simulaciones realizadas, han supuesto que el modelo de desvanecimiento seguido, es un modelo Rayleigh lento, el cual tiene un coeficiente de atenuación representativo del canal, que afecta a todo el bloque por igual. Se ha variado la distancia a la que se coloca el nodo auxiliar.

En una primera simulación, se ha situado el nodo auxiliar más alejado del receptor que el propio emisor para comprobar que, en esa situación, su colaboración es prácticamente nula y que los resultados obtenidos son muy parecidos al caso en el que no tenemos colaboración.

A continuación, se ha colocado el nodo auxiliar en distintas posiciones entre el emisor y el receptor observando que, cuanto más próximo se encuentra del receptor, mejores son las prestaciones del sistema global. Es algo, hasta cierto punto, lógico debido a que la información que le llega de un nodo auxiliar relativamente próximo al propio receptor será una información muy fiable debido a la proximidad. Se debe tener en cuenta que, estos resultados son un tanto ficticios ya que se está suponiendo que, por muy lejos que se encuentre el nodo auxiliar del emisor, éste es capaz de obtener la información proveniente de él sin errores.

Por último, se ha realizado una simulación en la que ya no existe una colaboración continua en el tiempo. La colaboración por parte del nodo auxiliar dependerá del coeficiente de atenuación existente entre el emisor y el nodo. Este último, conoce dicho coeficiente y puede decidir si colaborar o no debido a que, si el canal presenta un coeficiente de atenuación multitrayecto muy adverso, la mayoría de los bits llegarán corruptos y no tendrá sentido colaborar. Como se puede suponer, las prestaciones de este nuevo sistema serán peores que aquel en el que se estaba colaborando siempre. Para decidir si colaboramos o no, se define un umbral que depende de ese coeficiente de atenuación al que antes hacíamos referencia.

7. Conclusiones

En este trabajo, se han estudiado los fundamentos de las redes colaborativas y su conveniencia de utilización para entornos inalámbricos. Como ha sido explicado, no es posible tener tantas antenas como se quiera en un mismo terminal, básicamente, debido a la necesidad de portabilidad del mismo.

Con ello, se ha decidido usar los recursos presentes en nuestro entorno inalámbrico para aumentar el grado de diversidad espacial del sistema sin aumentar el número de antenas presentes en un mismo dispositivo. Se utilizan los recursos ofrecidos por otros nodos auxiliares presentes en la red que no están trabajando en ese momento.

Como se ha demostrado en la parte de resultados de nuestro trabajo, a través de diferentes simulaciones, el uso de nodos auxiliares mejora las prestaciones del sistema y sería algo recomendable de implementar en aplicaciones prácticas.

Éste, es un mecanismo prometedor en el campo de las comunicaciones inalámbricas y podría ser fundamental en el desarrollo de las futuras redes de telecomunicaciones.