

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS

Proyecto Final de Carrera
Ingeniería de Telecomunicación

**ALGORITMOS ADAPTATIVOS DE
CODIFICACIÓN DE FUENTE Y
CANAL PARA LA REDUCCIÓN
DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN
REDES DE SENSORES
INALÁMBRICOS
(Resumen en Castellano)**

Tutor:

Dr. Ing. F.J. Payán Somet

Candidato:

Benigno Zurita Ares

Autor
Benigno Zurita Ares

Universidad de Sevilla
Escuela Superior de Ingenieros

Dept. de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Camino de los Descubrimientos, s/n
41092 Sevilla, España

Email: benigno.zurita@gmail.com
Web: www.us.es, www.esi.us.es

Resumen

Uno de los mayores retos al que hay que enfrentarse cuando se diseñan Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) es la escasez de recursos computacionales y energéticos. En este trabajo tratamos este problema prestando especial atención a algoritmos que permiten una eficiente codificación de fuente y canal.

Por codificación distribuida de fuente (DSC) nos referimos a una técnica de codificación que se aplica sobre señales altamente correladas que son codificadas de forma independiente pero decodificadas de forma conjunta. En WSN, los esquemas de codificación distribuida proporcionan algoritmos de bucle cerrado que explotan la correlación existente entre las magnitudes medidas en los distintos nodos para reducir la cantidad de información que es necesario transmitir, obteniendo así una reducción del consumo total de energía. En las subsiguientes secciones desarrollamos un completo estudio de caracterización, junto con una implementación en una red de sensores real de los algoritmos previamente comentados. También llevamos a cabo un estudio de la estabilidad del bucle cerrado, propiedad que es testada por medio de simulaciones.

Mayores reducciones del consumo energético se pueden conseguir si se superponen esquemas de codificación energéticamente eficientes sobre los algoritmos de codificación distribuida de fuente previamente comentados. En nuestro trabajo investigamos y extendemos dos de estos esquemas de codificación. En este contexto, analizamos el rendimiento de la WSN en términos de consumo energético y probabilidad de error de bit, donde un detallado modelo del canal radio es tenido en cuenta. Un más detallado modelo del sistema (comparado con los previamente existentes [1][2]) nos

permite proponer nuevas soluciones que reducen el consumo de energía a la par que aseguran una adecuada probabilidad de error de bit.

Como parte relevante de nuestro trabajo hay que destacar la implementación del algoritmo de codificación distribuida de fuente en un banco de pruebas en el cual se usaron Berkeley Telos Motes como sensores, y se extendió una interfaz para interactuar con la red inalámbrica desde Matlab. De acuerdo con el trabajo experimental llevado a cabo, el consumo de energía puede ser, efectivamente, reducido.

Introducción

Recientes avances en la industria de los semiconductores han permitido la aparición de pequeños dispositivos, de bajo precio y consumo conocidos como nodos sensores, o simplemente sensores o nodos. Gracias a sus capacidades de medida, procesamiento y comunicaciones, estos dispositivos constituyen una plataforma multifuncional y flexible en la que se pueden desarrollar una gran cantidad de nuevas aplicaciones hasta ahora impensables.

Una red de sensores inalámbricos (WSN) se halla formada por cientos, miles de nodos sensores que colaboran entre sí para realizar una determinada tarea, y están densamente diseminados en el área monitorizada. Una gran variedad de aplicaciones, que se extienden desde la monitorización de fenómenos geofísicos (actividad sísmica) hasta la agricultura de precisión (gestión inteligente del riego), pueden ser implementadas gracias al uso de las redes de sensores inalámbricos.

Al contrario que las tradicionales redes inalámbricas o Ad-hoc, las redes de sensores inalámbricos se caracterizan por una alta densidad de nodos, frecuentes cambios en la topología de red y severas restricciones computacionales, de memoria y de potencia. Estas características, únicas y propias de las redes de sensores inalámbricos, plantean numerosos desafíos a la realización práctica de estas redes, que debe tener en cuenta múltiples aspectos tales como un bajo consumo de energía, propiedades de auto-organización, tolerancia a fallos, etc. En concreto, y debido a que los nodos sensores son alimentados por medio de baterías y en la mayor parte de los escenarios considerados es muy difícil o incluso imposible cambiarlas o recargarlas, la eficiencia energética es de vital importancia para el tiempo de vida de la red.

El medio inalámbrico es el usado para comunicarse entre distintos nodos sensores. Sin embargo, la naturaleza inalámbrica del canal lleva a tener que tratar con fenómenos indeseables tales como pérdidas de camino, desvanecimientos, interferencias y ruido que causan pérdidas de paquetes, errores de transmisión y serios retardos en la recepción de los datos. Por lo tanto, es necesario incluir el efecto del canal inalámbrico a la hora de diseñar cualquier red de sensores inalámbricos.

Todas las consideraciones previas muestran la necesidad de tratar adecuadamente el problema del consumo de energía. Múltiples esfuerzos han sido realizados en esta dirección, y un gran número de investigadores en la comunidad científica se hallan actualmente envueltos en algunos aspectos específicos tales como:

- Protocolos de red energéticamente eficientes: la mayoría de los algoritmos y protocolos de red diseñados para las redes inalámbricas tradicionales no cuentan con el consumo de energía entre sus factores de diseño, dando lugar a que sea inviable la extensión directa de estos protocolos para su uso en WSNs. Así, para que las redes de sensores puedan ser implementadas en la realidad, es necesario desarrollar primero protocolos de red que traten este problema para usar eficientemente la limitada energía disponible en los nodos sensores y prolongar así el tiempo de vida de la red.
- Control de potencia: una adecuada sintonización de la potencia de transmisión de los nodos sensores (transmitiendo siempre al menor nivel de potencia posible) posibilita la reducción del consumo total de potencia en la red.
- Topología de red: dentro de estas técnicas, las que gozan de mayor popularidad son aquellas en las que se deja 'dormir' un grupo de nodos sensores mientras otro está activo. Concretamente, mediante estas técnicas se logra reducir la redundancia presente en la red, así como las interferencias (menos nodos están activos en la vecindad), con lo que también se reduce la potencia de transmisión necesaria.
- Codificación adaptativa y distribuida de fuente: como consecuencia de la gran densidad de nodos en la red, la información medida pre-

senta una alta correlación tanto espacial como temporal. Así, mediante el desarrollo e implementación de técnicas de codificación de fuente que exploten esta característica se puede lograr una importante reducción de la información que es necesario transmitir (*i.e.* un menor consumo de energía). Sin embargo, los algoritmos deben ser lo suficientemente simples como para poder ajustarse a las limitadas capacidades de proceso y memoria de los nodos sensores.

- Codificación de fuente y canal energéticamente eficiente: como se señaló previamente, el denso despliegue de sensores (la distancia típica entre nodos es de algunos metros) causa serios problemas en las comunicaciones ya que el nivel de señal procedente de nodos vecinos puede ser tan elevado, que puede forzar a incrementar el nivel de potencia de transmisión empleado en el enlace considerado. CDMA es una prometedora técnica de acceso para las redes de sensores debido a sus propiedades de promediado de interferencias [3]. Sin embargo, el rendimiento de los sistemas CDMA se halla limitado por la interferencia de múltiple acceso (*multiple access interference*, MAI). En la pasada década se propusieron y desarrollaron numerosos métodos encaminados a la reducción de la MAI, la mayoría de los cuales se centraban en el diseño de receptores de correlación apropiados. Sin embargo, esto introduce un incremento considerable en la complejidad, lo que es un efecto indeseado en WSN. En vez de simplemente diseñar receptores para la supresión de interferencias, estas técnicas intentan representar de una forma inteligente la salida de la fuente con un diccionario de símbolos adecuado de forma que la MAI es reducida de una forma importante.

En nuestro trabajo desarrollamos los dos últimos apartados de la lista previa. En el Capítulo 1 estudiamos un algoritmo adaptativo de codificación distribuida de fuente con el que explotamos la redundancia existente en la información transmitida por la red para, localmente, procesar los datos medidos de forma que reducimos la cantidad de información que es necesario transmitir por el canal inalámbrico (y así, la potencia consumida); en el Capítulo 2 introducimos un esquema de codificación de canal y fuente a la vez que planteamos y resolvemos un problema de minimización de la

potencia consumida en la red. También desarrollamos un estudio teórico del rendimiento del sistema en términos de potencia consumida y probabilidad de error de bit, donde un detallado modelo del canal inalámbrico es tenido en cuenta; en el Capítulo 3 damos un paso más y presentamos un sistema de codificación de fuente y canal algo más complejo que en el Capítulo anterior; derivamos expresiones originales del consumo de potencia y probabilidad de error de bit; en el Capítulo 4 presentamos los resultados correspondientes a la implementación del algoritmo estudiado en el Capítulo 1 en una WSN real; finalmente, en el Capítulo 5, concluimos nuestro trabajo con la presentación de las conclusiones y un breve esbozo de las futuras líneas de trabajo.

Capítulo I

Codificación de fuente distribuida

Los avances llevados a cabo en la industria electrónica y de los semiconductores han hecho posible la aparición de diminutos dispositivos dotados con las más recientes tecnologías sensoras y de comunicación inalámbrica. Estos dispositivos, conocidos bajo el nombre de nodos sensores, se alimentan de baterías y se caracterizan, entre otras cosas, porque una vez desplegados, la posibilidad de acceder a ellos es muy reducida o incluso nula. Es por ello que es de vital importancia desarrollar técnicas que nos permitan reducir el consumo de potencia en dichas redes. En este capítulo, estudiamos un algoritmo presentado por Petrovic, Ramchandran y Chou [4].

También llevamos a cabo la implementación del citado algoritmo en una red de sensores real. Presentamos los resultados en el Capítulo 4.

El algoritmo estudiado se basa en la teoría del procesado adaptativo de la señal así como en la de codificación distribuida de fuente. La idea subyacente consiste en aprovechar la correlación existente en los datos para tratar de reducir la cantidad de información que es necesario transmitir.

Dos son las principales causas que provocan esta redundancia en los datos y que son tenidas en cuenta por el algoritmo:

Correlación espacial : aquellos nodos que estén situados unos cerca de otros mostrarán lecturas similares.

Correlación temporal : los nodos se hallan midiendo magnitudes físicas que poseen unas características determinadas de continuidad y progresión que hacen que medidas temporalmente próximas presenten un mayor parecido entre sí que otras más distantes.

Para la aplicación del algoritmo se considera que existen fundamentalmente dos tipos de nodos: nodos sensores y estaciones base, hacia donde fluye el flujo de información enviada por los primeros.

Una de las características más importantes y llamativas de este método es que no hace falta ningún intercambio de datos entre los nodos sensores, la eliminación de la redundancia (compresión de los datos) se lleva a cabo en cada nodo de una manera totalmente independiente, con el consecuente ahorro de energía. La única información que los nodos necesitan conocer es el número de bits al que tienen que comprimir las lecturas retornadas por los sensores. Esta información es provista por la estación base (EB) que también se encarga de descomprimir los datos. Obviamente, la complejidad del algoritmo es mucho mayor en el decodificador, *i.e.* la EB, que en el codificador, pero esto es asumible ya que la EB no suele tener ningún tipo de restricciones ni de memoria, ni de capacidad computacional.

Antes de seguir adelante, lo más importante es tener una idea clara de lo presentado hasta este momento: consideremos una red de sensores que se hallan midiendo continuamente alguna magnitud física y enviando los datos a una EB; dado que no podemos reemplazar los nodos que se quedan sin batería, estamos interesados en mandar la información con la menor redundancia posible; con el algoritmo presentado la EB monitoriza la correlación entre nodos e informa a cada nodo sensor del número de bits que espera recibir de él; cada nodo deberá, pues, comprimir la información medida en ese número de bits y enviarla a la EB, que será la que se encargue de decodificarla.

Codificador La operación de codificación es llevada a cabo en los nodos sensores. Es precedida por el cómputo (en la EB) del número de bits en que se debe comprimir la información. Supongamos que el convertidor analógico-digital (CAD) devuelve el valor leído en n bits y

queremos comprimirlo en i bits. El mapeado desde el valor original hasta el comprimido puede hacerse por una simple regla (1.1) de complejidad computacional mínima.

Decodificador Son varias las tareas que la EB tiene que llevar a cabo:

- **Predicción:** el primer paso en la ejecución del algoritmo es obtener, para un determinado sensor y para un determinado instante de tiempo, una estimación de la medida que va a solicitar.
- **Número de bits:** basándose en la exactitud de predicciones anteriores así como en otros parámetros del algoritmo (*e.g.* probabilidad de decodificar erróneamente una medida), la EB calcula el número de bits en que quiere que la información le sea enviada.
- **Decodificación:** cuando la EB recibe la información comprimida enviada por el nodo sensor, tiene que proceder a decodificarla, para lo cual utiliza la estimación calculada anteriormente.
- **Actualización y seguimiento de la estructura de la correlación entre nodos:** debido a la posición relativa de los sensores y a la magnitud física medida, distintos sensores presentarán distintos grados de correlación entre sus medidas. Esa relación existente entre las medidas procedentes de los distintos sensores es lo que se conoce con el nombre de 'estructura de la correlación'. Es frecuente que esta estructura cambie con el tiempo, lo que hace necesario actualizarla con una cierta frecuencia.

Un factor clave en el diseño del algoritmo es la obtención de una estimación lo más simple y precisa posible. Así, la predicción empleada es una combinación lineal de diferentes medidas disponibles en el decodificador: valores pasados del sensor considerado y medidas actuales procedentes de sensores geográficamente cercanos.

Los valores de los coeficientes empleados en la combinación lineal para obtener la predicción son calculados en una fase inicial de forma que minimicen el error cuadrático medio. La solución, conocida en la literatura como una estimación de Wiener, tiene como inconveniente una alta complejidad

computacional que tiene como consecuencia que no sea factible recalcularla en cada iteración. Esto no representaría ningún problema si la estructura de la correlación fuese invariante, pues con calcular los coeficientes una sola vez sería suficiente. Sin embargo, se puede comprobar que precisamente, la correlación entre nodos sensores cabía con el tiempo. Este problema fue superado con la aplicación del Método del Gradiente Máximo.

Capítulo II

Codificación ME

Ya se vio con anterioridad que las redes de sensores se caracterizaban por tener una gran densidad de nodos. Esta característica es la causante de que existan serios problemas en las comunicaciones, ya que los nodos transmisores pueden saturar a nodos receptores vecinos, que reciben un nivel de señal demasiado alto que puede enmascarar la señal deseada. Este fenómeno, en el que los nodos vecinos interfieren con sus señales en la señal deseada, recibe el nombre de interferencia de múltiple acceso (MAI, del inglés Multi-Access Interference). En este sentido, CDMA (Code Division Multiple Access) es una importante técnica de acceso cuya popularidad para su uso en redes de sensores va en aumento gracias a las buenas características que presenta en cuanto a comportamiento frente a interferencias.

En la pasada década se desarrollaron numerosos métodos encaminados a reducir la MAI, sin embargo, la mayoría de ellos se centraban en el desarrollo de complejos receptores que reducían las interferencias pero que en la práctica no son factibles en redes de sensores. En este capítulo adaptamos un enfoque distinto, investigamos las posibilidades que una adecuada codificación de fuente presenta cuando se usa conjuntamente con una modulación OOK (del inglés: On-Off Keying) en un esquema de transmisión DS-CDMA (Direct Sequence - Code Division Multiple Access).

OOK es una de las modulaciones más simples en las que se puede pensar. Representa la información digital como la presencia o ausencia de onda

portadora según transmitimos un nivel alto o bajo de señal, respectivamente. Aunque con un rendimiento inferior a la mayoría de las modulaciones clásicas, como por ejemplo BPSK (Binary Phase Shift Keying), en cuanto a probabilidad de error de bit debido a una reducida distancia en la constelación de señal, cuando se trata del consumo de energía presenta un comportamiento muy positivo que la convierte en una candidata ideal a ser implementada en este tipo de redes.

Una codificación ME (del inglés, Minimum Energy) tiene como objetivo, como su propio nombre indica, reducir el consumo de potencia en una red de sensores a la par que mejorar la calidad de las comunicaciones. Para ello emplea un sistema de codificación de fuente especial en un sistema DS-CDMA en el que la modulación BPSK es sustituida por una OOK.

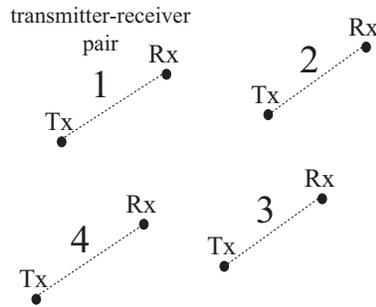
El objetivo final de la codificación ME es reducir la proporción de bits a uno (bits altos) de forma que la energía empleada en la transmisión de la información sea lo menor posible. Hay dos formas de hacer esto:

- Usar un conjunto de palabras de código (diccionario) con menor número de bits altos.
- Explotar las estadísticas de la fuente de tal forma que a los símbolos más frecuentes se les asigne aquellas palabras con menor número de unos.

La codificación ME aúna los dos principios anteriores para proporcionar el menor consumo de energía posible. Así, dicha codificación se realiza en dos pasos: el primero consistente en encontrar el diccionario (conjunto de posibles palabras de código) adecuado, el segundo en encontrar la asignación óptima.

Básicamente, con la codificación ME lo que hacemos es realizar un mapeo desde el diccionario original a otro más adecuado para el objetivo de ahorro de energía. Cada palabra del diccionario original tiene una única imagen en el conjunto de destino. Concretamente, las nuevas palabras de código tienen una longitud mayor que las originales y mayor número de ceros.

La codificación previamente vista permite reducir la interferencia de múltiple acceso (MAI) gracias a que, debido a que las nuevas palabras de código

Figura II.1: *Escenario*

tienen ahora un mayor número de ceros, la posibilidad de solapamiento (*i.e.*, la posibilidad de que varios nodos estén transmitiendo niveles altos de señal al mismo tiempo) disminuye.

Antes de poder calcular el rendimiento del nuevo sistema en términos de potencia consumida o probabilidad de error, es necesario que obtengamos un detallado modelo de señal y a partir de éste, parámetros que nos permitan medir la calidad del sistema de comunicaciones. En concreto, hemos considerado que nuestro sistema se halla formado por un número de parejas transmisor/receptor (ver Figura II.1) que acceden al medio inalámbrico utilizando un esquema DS-CDMA en el que la modulación BPSK ha sido sustituida por otra OOK y en el que se emplea una codificación ME. También consideramos un canal con ruido aditivo blanco gaussiano o AWGN (Additive White Gaussian Noise) si preferimos el acrónimo inglés. Consideraremos que toda señal presente en este canal sufre un desvanecimiento lento. En estas condiciones, se puede probar que la salida del receptor de correlación se halla compuesta por tres términos: la señal deseada, un término de interferencias debidas a otros usuarios y una componente de ruido gaussiano introducido por el canal.

Una vez tenemos el modelo de señal descrito, podemos proceder a calcular un importante parámetro que medirá la calidad del sistema de comunicaciones: la señal a ruido+interferencias, *SINR*. Un detallado análisis del procedimiento a seguir hasta hallar la forma cerrada de la misma se proporciona en el Capítulo 2. Un simple vistazo a la Ecuación (2.17) basta para rápidamente apreciar la ventaja de usar la codificación ME: podemos controlar la cantidad de MAI presente en el sistema.

En la Sección 2.8 llevamos a cabo una comparación en términos de potencia consumida, entre un sistema ME+OOK y un sistema BPSK clásico. Una detallada explicación del modelo de energías usado puede ser encontrado en el Capítulo 2.

Las principales conclusiones que se pueden extraer de la comparación realizada son dos: la primera es que mientras mayor sea el número de ceros en las palabras de código, mayor es la ganancia (algo que era esperable pero que hacía falta justificar). La segunda conclusión es que cuanto mayor es la potencia de transmisión, mayor es la ganancia que el nuevo sistema de codificación ofrece.

Como una mejora adicional al consumo de energía originado por la nueva técnica de codificación empleada, en nuestro trabajo proponemos y resolvemos un problema de optimización de la potencia consumida en la red (entendida como la suma de las potencias consumidas individualmente por cada nodo). Con este problema buscamos hallar las potencias de transmisión óptimas imponiendo como restricción que la probabilidad de que el sistema se encuentre no operativo (es decir, que la SINR se halle por debajo de un cierto umbral) sea menor que un cierto valor dado.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{P}}{\text{mín}} \sum_{i=1}^K P_i \\ \text{s.t. } & P[SINR_i \leq \gamma] \leq \bar{P}_{out}, \forall i = 1 \dots K \\ & P_i > 0 \quad \forall i = 1, \dots, K \end{aligned}$$

donde \mathbf{P} denota el vector formado por las potencias de transmisión empleadas en los distintos nodos.

$$\mathbf{P} = [P_1, \dots, P_i, \dots, P_K]^T$$

En la Figura 2.6 se puede observar la convergencia del límite (2.38). Debería observarse cómo la convergencia tiene lugar de una forma rápida y suave.

En la Sección 2.9 derivamos la probabilidad de error de bit existente en un sistema que utiliza una codificación ME. El cálculo de esta probabilidad no es inmediato y requiere el uso de ciertas aproximaciones y simplificaciones que lo alejan de la probabilidad de error de bit óptima.

En la Figura 2.7 mostramos la probabilidad de error de bit frente a la SINR (en decibelios). La principal conclusión a extraer de esta figura es que cuanto mayor es el ahorro de energía, menor es la probabilidad de error de bit. Esto es debido, lógicamente, a que la MAI es reducida cuando decremamos la potencia consumida en el sistema. Sin embargo, usar una codificación ME no puede ser todo ventajas. El inconveniente de usar una codificación ME es que, al alargar las palabras de código, o bien incrementamos la tasa de bits o el tiempo de transmisión. El primero no es realmente un problema, por cuanto el ancho de banda no es una restricción severa en redes de sensores, pero el último podría ser un problema cuando las aplicaciones ejecutadas requieran la transmisión de grandes cantidades de datos (algo que, afortunadamente, no es lo usual en aplicaciones que corren sobre redes de sensores).

Capítulo III

Codificación MME

En el Capítulo 3 estudiamos una nueva técnica de codificación que tiene su origen en la vista en el Capítulo 2 y de la cual hereda parcialmente su nombre: codificación MME (Modified Minimum Energy).

Ya se vio con anterioridad que una codificación ME permitía reducir la energía consumida en la red por medio del uso de un diccionario de palabras específico en el que las palabras de código tenían una longitud y un número de ceros mayor. También se comentó que en redes de sensores la distancia típica entre transmisor y receptor se reduce a unos pocos metros. En esta situación, se puede comprobar que la energía usada en recibir es equivalente (e incluso mayor) a la empleada en transmitir. El incremento de la longitud de las palabras en una codificación ME conlleva un incremento similar en el tiempo de recepción (suponemos una tasa de bits constante) que, debido al alto consumo de energía en el receptor, causa una degradación de la ganancia que una codificación ME ofrece. La codificación MME nace para solventar este problema. Sin embargo, la caracterización de la misma existente en la literatura es insuficiente e imprecisa, lo que nos lleva a realizar un minucioso estudio cuyos resultados presentamos a lo largo del Capítulo 3.

La codificación MME consiste básicamente en dividir la palabra de código procedente de la codificación ME en varias subtramas encabezadas por un bit indicador cada una. El esquema propuesto se muestra en la Figura 3.1. El valor del bit indicador depende del contenido de la subtrama correspondiente: si todos los bits de la subtrama son ceros (ese debe ser el caso más

probable si se ha codificado de forma correcta) el bit indicador mostrará un uno, en caso contrario (*i.e.*, existe algún bit distinto de cero en la subtrama) mostrará un cero.

Por otra parte, el receptor se halla modificado de forma que puede explotar las características de la codificación MME. Así, cuando el receptor recibe un bit indicador a uno, automáticamente entra en un estado de bajo consumo de energía, ya que no necesita recibir los bits que se hallen en esa subtrama, es sabido que todos son ceros. A lo largo del Capítulo 3 demostramos que esta política es útil y permite obtener mayores ganancias que las logradas con la codificación ME.

Al igual que en el Capítulo 2, antes de proceder a estudiar el comportamiento del sistema en términos de consumo de potencia y probabilidad de error de bit, es necesario determinar primero un modelo de señal válido a la par que una expresión de la SINR. Se puede comprobar que ambos son idénticos a los obtenidos en el Capítulo 2, por lo que no extenderemos más aquí una discusión sobre ambos.

Así, en la Sección 3.5 analizamos la probabilidad de error de bit que tiene lugar en este sistema, encontrando que es prácticamente la misma que la presentada por la codificación ME.

En la Sección 3.6 llevamos a cabo una comparación, en términos de consumo total de potencia, entre un sistema ME y otro MME. El modelo de energías empleado es detalladamente descrito e incorpora como novedad, el número de veces que el receptor tiene que recuperarse del estado de bajo consumo de energía (es importante tener en cuenta este parámetro ya que el tiempo que tarda en pasar de un estado inactivo a otro activo es demasiado grande como para ser despreciado).

Como principales conclusiones del análisis de consumo de energía podemos afirmar que la codificación MME aporta una reducción del mismo, comparado con el de una codificación ME. El precio a pagar es una disminución del rango de posibles regímenes binarios a utilizar, estando limitados a 10 *Kbps* en su cota superior. Esta limitación es introducida por la elevada magnitud del tiempo que el receptor tarda en pasar de un estado de baja energía a otro de normal operación.

Capítulo IV

Resultados experimentales

En el Capítulo 4 se lleva a cabo una implementación del algoritmo de codificación distribuida de fuente presentado en el Capítulo 1. En el experimento se emplearon los nodos sensores *Telos Motes* fabricados en Berkeley por la compañía *Moteiv*. Para más detalles sobre las características de los mismos se remite al lector a la Sección 4.1 donde puede encontrar desde la más sencilla descripción hasta la forma de convertir a unidades del Sistema Internacional los valores relativos retornados por los distintos sensores presentes en la placa.

La arquitectura elegida para la implementación del banco de pruebas (emulando aquella presentada en [4]) consistió en una estación base (EB) y cinco nodos sensores adicionales. En el experimento los nodos sensores se hallaban midiendo la temperatura de una habitación, medida que era codificada de acuerdo al algoritmo presentado en el Capítulo 1 y luego enviada vía radio a la EB quien, a su vez, debía decodificarla conforme al susodicho algoritmo. Para una mejor descripción del experimento se remite al lector, una vez más, al Capítulo 4. En lo que resta de capítulo trataremos simplemente de poner de manifiesto los principales resultados obtenidos.

En primer lugar, y como es deseable, hay que señalar que, una vez nos hallamos en el régimen permanente, el algoritmo sigue perfectamente y cometiendo un error mínimo el comportamiento de la temperatura, adaptándose incluso a cambios bruscos en la misma. Si observamos atentamente el comportamiento del algoritmo durante la fase inicial, se puede observar cómo

la diferencia entre el valor real de la temperatura y el estimado, se va reduciendo rápidamente hasta que el error cometido es prácticamente nulo (alrededor de 0,05 °C) hacia la sexta iteración. Dicho resultado valida, tanto el método de adaptación usado (el método del Gradiente) como los valores heurísticos utilizados en el mismo.

La Figura 4.5 es la más ilustrativa de todas, por cuanto muestra de una forma clara y concisa la reducción lograda en el número de bits transmitidos. Es fácil darse cuenta que si no realizásemos compresión de ningún tipo, siempre se transmitirían todos los bits devueltos por el CAD. Sin embargo, gracias al algoritmo de codificación distribuida de fuente utilizado, se puede apreciar cómo el número de bits enviado con mayor frecuencia es menor que la mitad del anterior.

Finalmente, es importante resaltar que, para el experimento llevado a cabo, el ratio de compresión logrado oscila en torno al 35-40 %.

En la Sección 4.4 investigamos aspectos adicionales del algoritmo tales como pueden ser la influencia de ciertos parámetros, la robustez del mismo frente a errores, etc.

Una conclusión importante de esta investigación es, por ejemplo que, para las dimensiones de las redes de sensores que se suelen implementar, el ratio de compresión no baja en ningún caso del 45 %.

La robustez del algoritmo ante la pérdida de paquetes es una cualidad deseada e importante, por cuanto ésta suele adoptar un valor elevado en redes de sensores. Para testar esta propiedad llevamos a cabo simulaciones en las que se utiliza un modelo del canal en que el ruido se produce a ráfagas (bursty noise channel model), concretamente, utilizamos el modelo de canal propuesto por Gilbert y Elliot [5]. Las numerosas simulaciones llevadas a cabo nos permiten concluir de una forma completamente general que el algoritmo es robusto frente a la pérdida de paquetes.

Capítulo V

Conclusiones

Los severos requerimientos impuestos por la miniaturización, coste y aislamiento de los nodos sensores sobre la energía consumida y la capacidad computacional disponible, tienen como consecuencia que las redes de sensores sean algo más que una simple variante de las tradicionales redes ad-hoc, y necesiten un diseño particular.

En los diferentes capítulos de este Proyecto Fin de Carrera, se han analizado diferentes esquemas de codificación de fuente y canal con el objetivo de reducir el consumo de potencia. En primer lugar, en los Capítulos 1 y 4 se presentó e implementó, respectivamente, un algoritmo de codificación distribuida de fuente, que demostró ser de gran utilidad para la reducción del consumo energético. Para redes de sensores suficientemente grandes se encontró que el ratio de compresión oscila en torno a valores cercanos al 50%. Además, se mostró la robustez del algoritmo frente a las pérdidas de paquetes en un canal Gilbert-Elliott.

Posteriormente, se expuso la codificación ME y se vio cómo puede contribuir a una reducción de la MAI y del consumo de energía cuando se usa conjuntamente con un sistema DS-CDMA en el que la modulación BPSK es sustituida por otra OOK. Sin embargo, la mayor longitud de las palabras de código conlleva un incremento de la energía consumida en el receptor.

Para solventar el problema anterior, se usó la codificación MME. La cual se caracterizó y comparó en términos de potencia consumida y probabilidad de error de bit con la codificación ME.

Asimismo, con el objetivo de reducir la energía consumida en la red, se propuso y solucionó un problema de optimización por el cual encontramos el nivel de potencia al cual los nodes deben transmitir.