

Desarrollo y Aplicaciones de un Simulador Dinámico de TDT Móvil DVB-H

David Gómez Barquero, David Gozávez, Pedro F. Gómez, Narcís Cardona

Grupo de Comunicaciones Móviles
Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM)
Universidad Politécnica de Valencia

Email: dagobar@iteam.upv.es

Abstract — Este artículo discute la necesidad de realizar simulaciones dinámicas a nivel de sistema para el estándar de TDT móvil DVB-H (*Digital Video Broadcast – Handheld*) para evaluar el nivel de calidad de servicio percibido por los usuarios. Este tipo de simulaciones se utilizan para evaluar el funcionamiento de los sistemas de comunicaciones móviles de manera dinámica a lo largo del tiempo, en particular aspectos relacionados con la gestión de recursos radio y la calidad del servicio, siendo utilizadas como complemento a las herramientas tradicionales de planificación. En este artículo se analizan en detalle todos los modelos necesarios para realizar este tipo de simulaciones para DVB-H, incidiendo en el modelo de rendimiento de la capa física. En el artículo se propone un modelo de rendimiento basado en procesos de Markov cuyo comportamiento ha sido validado con medidas de campo. Por último, se proporcionan resultados de ejemplos prácticos de utilización del simulador en la red piloto DVB-H de la Universidad de Turku en Finlandia.

I. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

A. Background

Dentro de las comunicaciones móviles multimedia, uno de los máximos exponentes a día de hoy es la TV móvil. El mayor potencial para proporcionar estos servicios lo representan las redes de Televisión Digital Terrestre (TDT) diseñadas específicamente para servicios móviles (redes de TDT móvil). Sólo estas redes tienen las capacidades necesarias para soportar un consumo a gran escala de este tipo de servicios, ya que pueden distribuir servicios multimedia de banda ancha a grandes audiencias cubriendo extensas áreas.

El estándar europeo de TDT móvil es conocido como DVB-H (*Digital Video Broadcasting – Handhelds*), el cual es una evolución tecnológica del estándar de TDT, DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), adaptado para terminales móviles [1]. Sus principales características son la utilización de una técnica de transmisión discontinua en la que la información se transmite a ráfagas, la cual reduce considerablemente el consumo de potencia medio de los terminales, y la transmisión de la información en forma de paquetes IP. Además, añade un mecanismo de corrección de errores adicional en la capa de enlace conocido como MPE-FEC (*Multi Protocol Encapsulation – Forward Error Correction*), el cual proporciona una mayor robustez a la transmisión, sobre todo en situaciones de movilidad e interferencias impulsivas. Italia fue el primer país en ofrecer los primeros servicios comerciales DVB-H en verano de 2006. Actualmente también se ofrecen en Finlandia, Suiza, Austria, Holanda y Albania, y se espera que durante este año 2008 se inicien en Francia, y Rusia [2]. En España la implantación de la TDT móvil está prevista para el año 2010, una vez que se produzca el llamado apagón analógico.

La planificación tradicional de redes de TV (tanto analógica como digital) se basa en un análisis estático cuyo objetivo es garantizar un determinado nivel de cobertura (porcentaje de localizaciones cubiertas en el área de servicio con una muy alta probabilidad). Sin embargo, las redes de TDT móvil como DVB-H requieren de análisis dinámicos al igual que en el caso de las redes celulares de telefonía móvil. Esto es debido a que la calidad del servicio (QoS, *Quality of Service*) experimentada por los usuarios depende de la cantidad total de errores de transmisión experimentados por los usuarios así como de su evolución temporal. Por este motivo la calidad de servicio no puede ser estudiada únicamente a partir de indicadores de rendimiento que reflejan una media dentro de un área determinada, como la probabilidad de cobertura o tasa media de error de burst utilizadas normalmente durante la fase de planificación de redes DVB-H.

B. Servicios Multimedia y Calidad de Servicio en DVB-H

Los servicios DVB-H se clasifican en dos tipos básicos: servicios de streaming y servicios de descarga de ficheros [3]. En los servicios de streaming un flujo continuo de datos de audio y video es transmitido y directamente consumido por los usuarios. El servicio más característico es la TV móvil. Los terminales reproducen la información recibida en el último burst de tal manera que los usuarios no perciben una transmisión discontinua. Si un burst se pierde, la reproducción se interrumpe hasta que el siguiente burst es recibido. Por otro lado, los servicios de descarga de ficheros consisten en la transferencia de una cantidad finita de datos a los terminales que es almacenada como un archivo. Ejemplos representativos son descargas de periódicos digitales, archivos de música, software, etc. En este caso los terminales almacenan la información correctamente

recibida de cada burst asociado al archivo, hasta que el fichero completo esta disponible en el receptor. Una vez almacenado el fichero ya puede ser accedido por las aplicaciones.

Los servicios de video streaming se caracterizan por tolerar algunos errores en la transmisión siempre y cuando la calidad del audio y el video sea suficiente para proporcionar una experiencia satisfactoria al usuario. El criterio de degradación comúnmente empleado es una tasa máxima de bursts erróneos del 5% [1]. Este criterio se conoce como MFER5% (*MPE-FEC Frame Error Rate*). Otro indicador de rendimiento que refleja mejor la cantidad total de información correctamente recibida es la tasa de paquetes IP erróneos (IP PER, *IP Paquet Error Rate*). En comparación con el MFER, el IP PER tiene en cuenta la posibilidad de recibir bursts parcialmente erróneos. Tanto el MFER como el IP PER son medidas que reflejan la cantidad total de errores de transmisión experimentados por los usuarios. Sin embargo, la QoS percibida por los usuarios depende también de la distribución temporal de los errores. En general, los errores son más molestos cuanto menos concentrados están. Criterios que tienen en consideración la distribución de los errores en el tiempo son la tasa de segundos erróneos (ESR, *Erroneous Second Ratio*) en los que hay por lo menos un paquete IP erróneo, y especialmente el criterio ESR5(20), que representa el porcentaje de intervalos temporales de 20 segundos con un segundo erróneo como máximo.

Los servicios de transferencia de ficheros típicamente requieren una transmisión sin errores de los archivos, ya que un único bit erróneo conlleva la pérdida de todo el archivo, haciéndolo inútil para el receptor. El principal indicador de QoS es por tanto si se ha recibido el fichero correctamente o no, aunque también es importante el tiempo de descarga. Para incrementar la robustez de la transferencia de ficheros en DVB-H, se ha adoptado un mecanismo corrector de errores adicional en la capa de enlace (AL-FEC, *Application Layer FEC*) basado en códigos Raptor [3].

C. Evaluación de la Calidad de Servicio DVB-H mediante Medidas de Campo

Las medidas de campo son obviamente el medio más preciso para evaluar el rendimiento de cualquier sistema de comunicaciones móviles inalámbrico. Para ello es necesario disponer por lo menos de un transmisor y de un receptor, así como de los demás equipamientos necesarios. Las medidas de campo pueden ser complementadas con medidas de laboratorio si se dispone de un emulador de canal.

La Figura 1 muestra un ejemplo de los datos guardados durante una campaña de medidas DVB-H en la red piloto de la Universidad de Turku (Finlandia). En las medidas se utilizaron dos receptores profesionales DVB-H y un receptor GPS. Las medidas registraron el nivel de señal DVB-H recibido (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*), la posición y velocidad del terminal con el GPS, y la traza de errores de paquetes MPEG-2 TS (*Transport Stream*) de la capa física (secuencia de unos y ceros denotando paquetes recibidos correcta e incorrectamente). Almacenando la traza de errores de paquetes MPEG-2, es posible reproducir la QoS de un servicio cualquiera en la trayectoria medida para diferentes configuraciones de transmisión de DVB-H mediante la emulación de las capas superiores. Como ejemplo, la Figura 2 muestra el número acumulativo de segundos erróneos en un servicio de streaming de 256 kb/s para diferentes tasas de codificación MPE-FEC. Se ha asumido la técnica de decodificación de MPE-FEC convencional (modo *erasure decoding*), por el cual se descarta cada sección MPE que contiene al menos un paquete MPEG-2 erróneo. También se han asumido 512 filas por trama MPE-FEC (burst, tamaño máximo 1 Mb) y un tamaño de paquete IP constante igual a 512 bytes, así como que cada paquete IP correctamente recibido puede ser reproducido sin necesidad de otros paquetes IP.

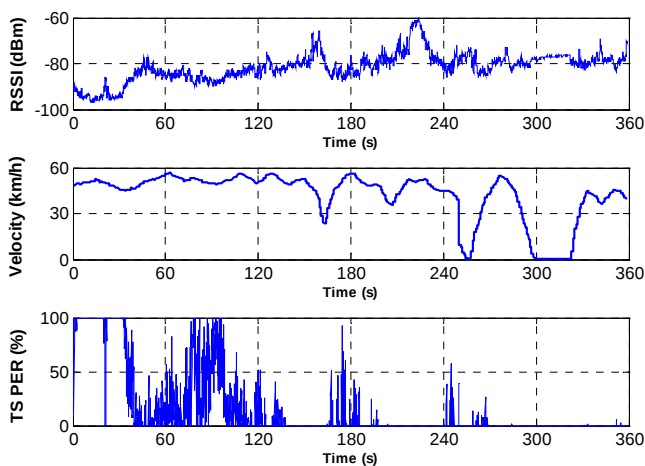


Fig. 1. Ejemplo de medidas de campo DVB-H tipo vehicular.

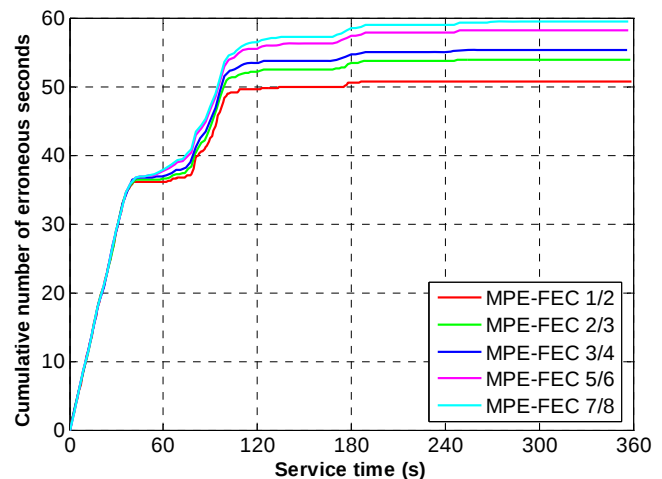


Fig. 2. Evolución temporal de los errores para un servicio de streaming a 256 kb/s a lo largo de la trayectoria medida.

El principal inconveniente es que los resultados mostrados en la Figura 2 solamente son válidos para la trayectoria en la que se han efectuado las medidas y para la configuración de red utilizada. Para poder extraer conclusiones sobre el rendimiento global del sistema experimentado por los usuarios en toda el área de servicio para una determinada configuración de red sería necesario realizar un número muy elevado de medidas.

Si, por ejemplo, quisiéramos hablar en términos de porcentaje de usuarios satisfechos (para un determinado criterio de QoS), serían necesarias por lo menos 10.000 trayectorias independientes para obtener unos resultados estadísticamente fiables con una precisión del 1%. Sin embargo, el coste de los equipos, así como del material utilizado para realizar medidas de campo es muchas veces prohibitivo, por lo que las simulaciones son una herramienta de análisis fundamental. Obviamente, esto no excluye la realización de medidas de campo destinadas a verificar los resultados obtenidos mediante simulaciones para el escenario bajo estudio, pero aún así la reducción potencial del coste es muy grande. Además, las simulaciones se pueden utilizar para procesar las medidas y realizar estudios de optimización del sistema.

D. Evaluación de la Calidad de Servicio DVB-H mediante Simulaciones Dinámicas

Hoy en día los sistemas de comunicaciones móviles son analizados utilizando simuladores dinámicos a nivel de sistema y simulaciones Monte Carlo. Esto es, repitiendo el mismo experimento muchas veces con semillas aleatorias diferentes y promediando los resultados (cuanto mayor sea el número de iteraciones, mayor es la precisión de los resultados). Los simuladores dinámicos a nivel de sistema permiten evaluar el funcionamiento del sistema de manera dinámica a lo largo del tiempo, en particular aspectos relacionados con la gestión de recursos radio (RRM, *Radio Resource Management*) y la calidad de servicio experimentada por los usuarios.

En el caso particular de DVB-H, este tipo de simuladores pueden ser un buen complemento a las herramientas tradicionales de planificación, ya que pueden evaluar la influencia de nuevos emplazamientos no sólo en términos de cobertura, sino también en términos de QoS. Por ejemplo se podría monitorizar la calidad de un servicio de streaming experimentada por los usuarios al moverse por el área de servicio, así como determinar el porcentaje de usuarios que recibirían correctamente un fichero. Otro ejemplo más complejo sería evaluar las prestaciones de un sistema híbrido celular y DVB-H para la transmisión de ficheros con diferentes estrategias (algoritmos) de gestión de recursos radio.

Como se ha comentado anteriormente, DVB-H utiliza una técnica de transmisión discontinua, en la que la información se transmite a ráfagas (bursts). Básicamente, el simulador dinámico debe predecir la información recibida correctamente por cada usuario en cada burst durante la transmisión del servicio bajo estudio al moverse por el área de servicio. A partir de la información sobre los paquetes MPEG-2 de capa física recibidos erróneamente es posible emular las capas superiores y calcular cualquier criterio de QoS, como en el ejemplo de las figuras 1 y 2. Obviamente el simulador debe predecir resultados fiables y ser computacionalmente eficiente para poder simular grandes cantidades de usuarios.

En este artículo se describen los diferentes modelos necesarios para realizar simulaciones dinámicas a nivel de sistema en DVB-H, incidiendo en el modelo de rendimiento de la capa física. En el artículo se propone un modelo de rendimiento basado en procesos de Markov de cuatro estados y se presentan resultados de validación de su comportamiento con medidas de campo. Además se proporcionan ejemplos prácticos de utilización del simulador en la red piloto DVB-H de la Universidad de Turku en Finlandia.

II. ESTRUCTURA DE UN SIMULADOR DINÁMICO DVB-H

Cuatro bloques pueden ser claramente identificados en un simulador dinámico DVB-H a nivel de sistema: módulo de movilidad, módulo de cobertura, módulo de rendimiento DVB-H de capa física y módulo de emulación de las capas superiores (enlace y aplicación). El módulo de movilidad mueve a los usuarios dentro del área de servicio y calcula la velocidad de los usuarios en los instantes que reciben un burst de datos. El módulo de cobertura calcula el nivel de señal DVB-H medio durante la recepción de un burst por cada usuario.

El módulo de rendimiento DVB-H de capa física calcula qué paquetes MPEG-2 recibe correctamente cada usuario utilizando la información de velocidad y señal proporcionada por los otros dos módulos. Por último el módulo de emulación de las capas superiores calcula la calidad de servicio experimentada por cada usuario para diferentes criterios de QoS a partir de la información sobre la información recibida correctamente durante la transmisión del servicio. En la Figura 3 se muestra la arquitectura del simulador dinámico de sistema DVB-H.

A. Modelo de Movilidad

Los modelos de movilidad son siempre un elemento importante en modelos de sistema, ya que los resultados pueden variar bastante para diferentes trayectorias y velocidades de usuario. Por este motivo es muy importante que el modelo de movilidad esté basado en observaciones de tráfico del escenario bajo estudio.

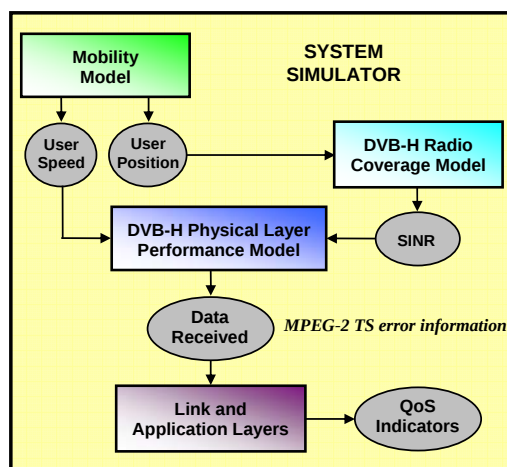


Fig. 3. Diagrama de bloques de un simulador dinámico DVB-H.

Obviamente es necesario contar con diferentes modelos para estudiar diferentes escenarios de recepción (peatón en interiores y exteriores, y vehicular en entorno urbano y autopista). Un buen ejemplo de un modelo de movilidad realista para usuarios en vehículos en entornos urbanos se puede encontrar en [4]. Otro aspecto importante es cómo distribuir los usuarios inicialmente sobre el área de servicio. Típicamente se distribuyen uniformemente, a no ser que se disponga de información concreta sobre las densidades de población.

B. Modelo de Cobertura

El modelo de cobertura también es un elemento fundamental en el simulador dinámico para determinar el nivel de la señal DVB-H recibida por los usuarios. La capa física del estándar DVB-H se caracteriza por una muy rápida transición entre recepción casi perfecta y recepción nula, y por tanto es crítico determinar las áreas con cobertura.

La variabilidad temporal del nivel de señal en un canal móvil se puede descomponer en tres partes: pérdidas de propagación debidas a la separación entre el transmisor y el receptor (*path-loss*), desvanecimientos lentos producidos por la obstaculización de la señal por las variaciones del perfil entre el transmisor y receptor (terreno, montañas, edificios, etc.), conocidos como *slow-term fading* o *shadowing*, y desvanecimientos rápidos de la señal producidos por la reflexión múltiple de ésta en los objetos cercanos al terminal (*fast-term fading* o *fast fading*).

Cabe destacar que el modelo de cobertura tan sólo proporciona la potencia media de la señal DVB-H recibida debida al *path-loss* y *shadowing*, ya que el efecto del *fast fading* se tiene en cuenta en el modelo de rendimiento DVB-H. Normalmente para reducir el tiempo de simulación se precalculará un mapa de cobertura del área de servicio con el nivel de señal medio utilizando las herramientas de planificación tradicional, y en las simulaciones sólo se generará el *shadowing* experimentado por cada usuario (que se suele modelar como un proceso log-normal espacialmente correlado).

A la hora de calcular el mapa cobertura de una red DVB-H, además de predecir la potencia recibida en cada punto debida a cada uno de los transmisores de la red, es necesario determinar la forma en que las señales provenientes desde los diferentes transmisores van a combinarse o interferirse entre sí. Por este motivo, la medida de cobertura en una red de frecuencia única SFN (*Single Frequency Network*) es la relación señal a interferencia más ruido (SINR). En una red SFN todos los transmisores están sincronizados en tiempo y frecuencia mediante la utilización de una señal de referencia GPS, lo cual permite a los receptores combinar las señales procedentes de varios transmisores. Las señales recibidas dentro del intervalo de guarda son consideradas como útiles y contribuyen totalmente a la señal útil, mientras que las señales recibidas fuera de este intervalo de guarda causan interferencia. Normalmente se suele utilizar una función de ponderación que determina la contribución a la señal útil y a la interferencia de las señales recibidas por los distintos emisores según su tiempo de llegada al receptor. En redes de pequeño tamaño, las interferencias causadas por la propia red son despreciables, y por tanto el mapa de cobertura puede expresarse también en términos de la potencia de la señal recibida. La precisión de los modelos de propagación dependerá de la resolución de la cartografía existente, siendo la cartografía 3D la más completa, con información sobre la altura y morfología del terreno (*clutter*) así como de las formas de los edificios. Además los modelos de propagación pueden ser calibrados con medidas de campo para mejorar su precisión. Otros aspectos que han de tenerse en cuenta son la técnica de sincronización del terminal y que las diferentes señales útiles e interferentes combinadas en el receptor están correladas.

La Figura 4 muestra un mapa de Turku y la localización y características de los transmisores de la red DVB-H bajo estudio. La Figura 5 muestra el mapa de cobertura en términos de RSSI para el modo de transmisión DVB-H 8K GI 1/4 16QAM 1/2 y recepción en exteriores para peatones. Este mapa de cobertura fue generado por el proveedor finlandés de servicios de radiodifusión Digita dentro del marco del proyecto europeo Celtic Wing TV, usando el modelo de propagación CRC (*Canadian Research Corporation*) con información de altura del terreno, edificios y *clutter* (tamaño de píxel de 110 m) [5].

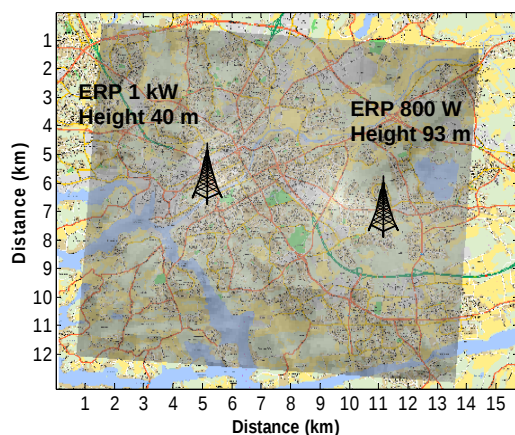


Fig. 4. Mapa de Turku (Finlandia) con la localización y características de los transmisores de la red DVB-H analizada.

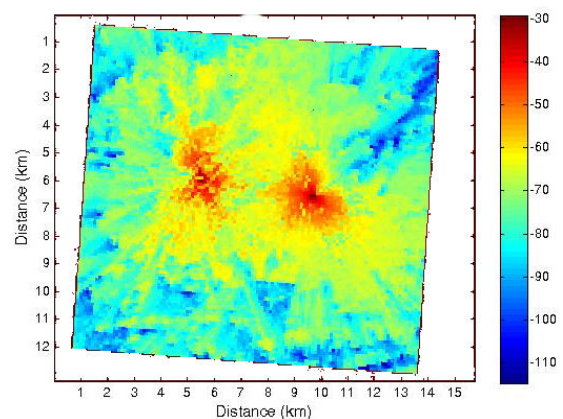


Fig. 5. Mapa de cobertura RSSI (dBm) *pedestrian outdoor*. Modo de transmisión DVB-H: FFT 8K GI 1/4 16QAM 1/2.

C. Modelo de Rendimiento de la Capa Física DVB-H

La función del modelo de rendimiento dentro del simulador es predecir qué paquetes MPEG-2 TS se recibirán correctamente por cada usuario en cada burst a partir de la información proporcionada por los modelos de cobertura y movilidad. Los parámetros de entrada de los modelos de rendimiento deben ser:

- Modo de transmisión en la capa física: tamaño FFT, intervalo de guarda GI, modulación y tasa de codificación.
- Tipo de entorno y tipo de canal.
- Relación señal a interferencia más ruido media durante la recepción del burst.
- Frecuencia Doppler.

El modo de transmisión es fijo y se decide en la fase de planificación en función de la capacidad deseada y de la máxima velocidad de los usuarios y la máxima distancia entre transmisores. Por otro lado, el tipo de canal también se puede considerar fijo para un escenario de simulación. Por ejemplo, el modelo de canal TU6 es representativo para recepción móvil DVB-H para altas velocidades en vehículos [1], mientras que para recepción a bajas velocidades tipo peatón se han propuesto nuevos canales conocidos como PI/PO (*Pedestrian Indoor/Pedestrian Outdoor*) [6].

En general los modelos de canal especifican el número de ecos (*taps*) visto por los terminales, especificando su nivel de potencia, retraso temporal y tipo de espectro, y tienen en cuenta los desvanecimientos rápidos de la señal debido al movimiento de los terminales (*fast fading*). Los parámetros de entrada son la relación portadora a ruido CNR media y la máxima frecuencia Doppler. En el simulador estos se calculan a partir de la información proporcionada por los modelos de movilidad y cobertura. En concreto, la SINR se puede mapear directamente a CNR en la capa física, y la frecuencia Doppler está directamente relacionada con la velocidad del terminal y la frecuencia de operación del sistema.

III. ESPECIFICACIÓN DEL MODELO DE RENDIMIENTO DE LA CAPA FÍSICA DVB-H

En este artículo se describe un modelo de Markov de cuatro estados propuesto en [7] y [8] para aproximar las longitudes de las secuencias de paquetes MPEG-2 TS recibidos correcta e incorrectamente en la capa física DVB-H en función de los valores de relación portadora a ruido en la capa física CNR y frecuencia Doppler. La dependencia entre las condiciones de recepción y los parámetros del modelo se obtienen calculando, bien a partir de medidas de laboratorio o bien a partir de simulaciones, los estadísticos de error de paquete para un modo de transmisión DVB-H y un modelo de canal dados.

A continuación se formulan las ecuaciones necesarias para obtener las probabilidades de transición entre los estados y los estadísticos de error de paquetes, se explica el proceso de parametrización y se presentan resultados de validación con medidas de campo del modelo derivado a partir de medidas de laboratorio con terminales profesionales DVB-H y un emulador de canal TU6. Una explicación más detallada se puede encontrar en [7] y [8].

A. Estructura del Modelo

Para modelar las trazas de error de paquetes MPEG-2 TS de DVB-H se ha empleado un modelo de Markov de cuatro estados con la siguiente matriz de probabilidades de transición:

$$P = \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & (1-\alpha_1)w_3 & (1-\alpha_1)w_4 \\ 0 & \alpha_2 & (1-\alpha_2)w_3 & (1-\alpha_2)w_4 \\ (1-\alpha_3)w_1 & (1-\alpha_3)w_2 & \alpha_3 & 0 \\ (1-\alpha_4)w_1 & (1-\alpha_4)w_2 & 0 & \alpha_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde $\alpha_i \in [0,1]$ y $\sum_{i \in C} w_i = \sum_{i=1}^N w_i = 1, \sum_{i \in E} w_i = \sum_{i=N+1}^{N+M} w_i = 1$.

Las transiciones que terminan en los estados 1 y 2 están asociadas a la recepción errónea de paquetes, mientras que los estados 3 y 4 corresponden a la recepción correcta de paquetes.

La Figura 6 muestra el diagrama de estados del modelo de Markov adoptado. También se indica de manera cualitativa las probabilidades de permanecer en los estados. De la figura se pueden extraer las propiedades estadísticas del modelo. La probabilidad de error de paquete del modelo de error se define como:

$$P(Z=e) = \frac{w_3}{(1-\alpha_3) \left(\sum_{k=1}^4 \frac{w_k}{1-\alpha_k} \right)} + \frac{1-w_3}{(1-\alpha_4) \left(\sum_{k=1}^4 \frac{w_k}{1-\alpha_k} \right)} \quad (2)$$

La longitud media de las secuencias de paquetes correctamente recibidos es:

$$\mu_c = \frac{w_1}{1-\alpha_1} + \frac{(1-w_1)}{1-\alpha_2} \quad (3)$$

La longitud media de las secuencias de paquetes erróneamente recibidos es:

$$\mu_E = \frac{w_3}{1-\alpha_3} + \frac{(1-w_3)}{1-\alpha_4} \quad (4)$$

La varianza de las secuencias de paquetes correctamente recibidos es:

$$\sigma_C^2 = \frac{w_1\alpha_1(1-\alpha_2)^2 + w_2\alpha_2(1-\alpha_1)^2 + w_1w_2(\alpha_2-\alpha_1)^2}{(1-\alpha_1)^2(1-\alpha_2)^2} \quad (5)$$

La varianza de las secuencias de paquetes erróneamente recibidos es:

$$\sigma_E^2 = \frac{w_3\alpha_3(1-\alpha_4)^2 + w_4\alpha_4(1-\alpha_3)^2 + w_3w_4(\alpha_4-\alpha_3)^2}{(1-\alpha_3)^2(1-\alpha_4)^2} \quad (6)$$

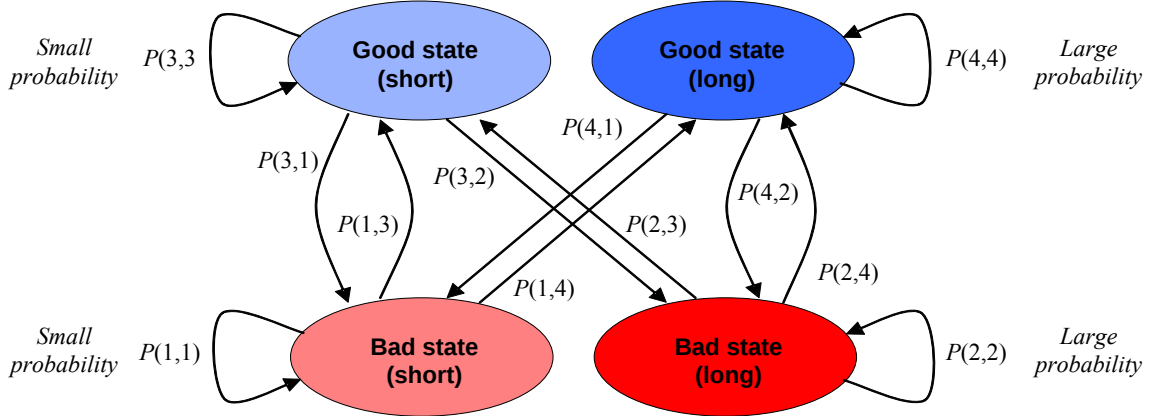


Fig. 6. Diagrama de estados del modelo de Markov empleado. Los estados buenos corresponden a estados en los que se recibe correctamente un paquete TS MPEG-2, y los malos a recepciones erróneas. $P(i,j)$ determina la probabilidad de pasar del estado i a j .

Mediante el método de los momentos, se resuelven las ecuaciones a partir de los estadísticos de error obtenidos de trazas de error de paquetes TS MPEG-2 de DVB-H simuladas o medidas para el modo de transmisión y modelo de canal deseados. Estos estadísticos consisten básicamente en la probabilidad de error de paquete, las longitudes medias de los bursts erróneos y de los huecos entre dichos bursts y las correspondientes varianzas. Los parámetros del modelo pueden obtenerse ahora resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} P(Z=e) = P(q_E) \\ \mu_C = \bar{L}_C \\ \mu_E = \bar{L}_E \\ \sigma_C^2 = S_{L_C}^2 \\ \sigma_E^2 = S_{L_E}^2 \end{cases} \quad (7)$$

Aunque el sistema de ecuaciones de arriba es un sistema indeterminado sin solución única, se pueden obtener soluciones mediante métodos numéricos como el algoritmo de Levenberg-Marquart.

B. Parametrización

El objetivo de la parametrización del modelo es relacionar los estadísticos de error de paquetes MPEG-2 TS considerados y las condiciones físicas de recepción descritas por la CNR y la frecuencia Doppler para las simulaciones dinámicas. Para ello se emplea una función de aproximación para interpolar y extrapolar los estadísticos de error de paquete a partir del conjunto de trazas medidas/simuladas. A continuación se describe la parametrización realizada para obtener los resultados presentados en este artículo.

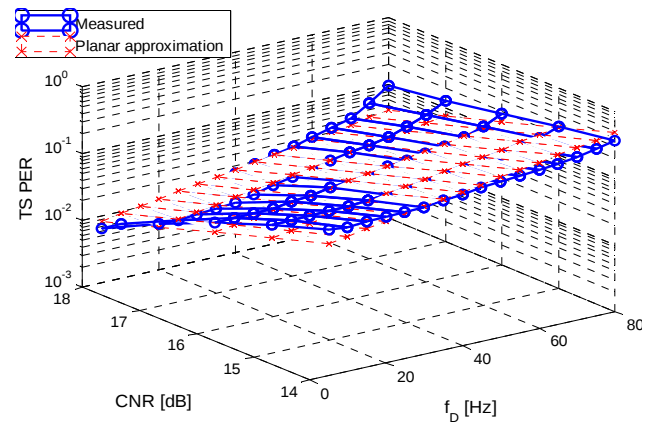


Fig. 7. Ejemplo de estima de las estadísticas de error de paquete en función de los valores de CNR y Doppler. Canal TU6, modo de transmisión DVB-H: FFT 8K, GI 1/4, 16-QAM

En concreto se realizaron un conjunto de medidas de laboratorio empleando un receptor profesional DVB-H y un emulador de canal (operando para un modelo de canal TU6) para el modo de transmisión de capa física: tamaño de FFT 8K, intervalo de guarda 1/4, modulación 16-QAM, y tasa de codificación 1/2. Se midieron trazas de paquetes MPEG-2 TS erróneos para valores de CNR entre 14 y 18 dB (a intervalos de 1 dB) y frecuencias Doppler entre 5 y 80 Hz (a intervalos de 5 Hz). Los estadísticos necesarios descritos en la sección anterior se calcularon para cada traza. Los estadísticos se aproximaron después como funciones de los valores de CNR y frecuencia Doppler empleando aproximación LSE (*Least Squared Error*) en la escala logarítmica. La figura 7 muestra esta estimación para los valores de CNR y Doppler evaluados.

C. Validación

Para validar el modelo de rendimiento de capa física DVB-H propuesto se realizó una campaña de medidas de campo de 2 horas de duración como la mostrada en la Figura 1 [9]. La validación consistió en comparar la traza de error de paquetes MPEG-2 TS medida con la obtenida con el modelo de rendimiento utilizando la información medida de RSSI y velocidad como parámetros de entrada. La Figura 8 muestra un ejemplo de los resultados de validación obtenidos para la trayectoria medida de ejemplo mostrada en la Figura 1. Se puede apreciar cómo el ratio de paquetes erróneos a lo largo del tiempo de la traza simulada se aproxima bastante bien la medida.

Resultados adicionales de la validación se pueden encontrar en [9], donde también se investigó el efecto de añadir ruido a las medidas de RSSI y velocidad para ver su efecto en los resultados proporcionados por el modelo de rendimiento, así como se comparó los resultados obtenidos utilizando el mapa de cobertura mostrado en la Figura 5.

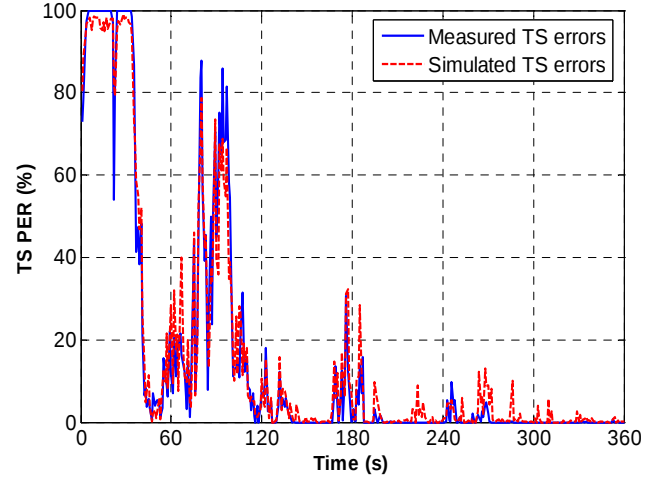


Fig. 8. Simulación dinámica de paquetes MPEG-2 TS erróneos usando los valores medidos de RSSI y velocidad de la trayectoria medida mostrada en la Fig. 1.

IV. APLICACIONES DEL SIMULADOR DINÁMICO DVB-H

En esta sección se presentan diferentes aplicaciones de los simuladores DVB-H a nivel de sistema para servicios de streaming y de transferencia de ficheros utilizando la red piloto DVB-H de la Universidad de Turku mostrada en la Figura 4. Se han considerado usuarios dentro de vehículos, los cuales se encuentran inicialmente distribuidos en el centro de Turku tal y como se muestra en la Figura 9. Los usuarios no abandonan el área de servicio sino que rebotan en los bordes. En la figura se muestran varios ejemplos de trayectorias de usuarios (tiempo de simulación de 10 minutos).

El modelo de movilidad empleado está basado en [4]. Dicho modelo captura los movimientos de los usuarios con tres variables aleatorias: longitud de calle, cambio de dirección en los cruces y velocidad media. Básicamente, el modelo asigna al usuario una nueva velocidad, longitud de calle, y un cambio de dirección relativo cuando terminan de moverse a lo largo de la calle actual. El modelo provee de diferentes funciones de distribución con un número limitado de parámetros que pueden particularizarse fácilmente para una ciudad en particular. Los cambios de dirección en los cruces se expresan con cuatro variables aleatorias asociadas con el giro a la izquierda p_{-90° , giro a la derecha p_{90° , vuelta p_{180° , y continuar todo recto p_{0° . Se asumen normalmente distribuidas con la misma desviación estándar igual a $\pi/32$. La variable aleatoria longitud de calle $\underline{s}$ asume que sigue una distribución Rayleigh, con una media $\bar{d}$. Finalmente la velocidad de los usuarios se modela de acuerdo con una distribución Rayleigh/Rice para distinguir entre calles y avenidas. Los parámetros de velocidad son las velocidades medias de la ciudad para las calles y avenidas y respectivamente, desviación estándar de velocidad σ_v , y el porcentaje de coches en las avenidas p_{mr} . Los valores utilizados en las simulaciones son: $p_{-90^\circ}=0.15$; $p_{90^\circ}=0.25$; $p_{180^\circ}=0.005$; $p_{0^\circ}=0.595$; $\bar{d}=250$; $\sigma_v=2.7778$; y $p_{mr}=0.5$.

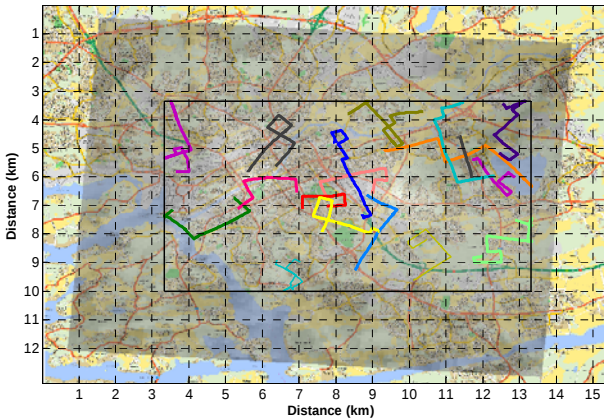


Fig. 9: Mapa de Turku, área de servicio simulada y ejemplos de trayectorias de usuarios durante 10 minutos.

TABLA II

	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
MFER	64.6 %	61.1 %	58.8 %	55.7 %	53.4 %
IP PER	66.5 %	65.4 %	65.2 %	64.5 %	63.5 %

Porcentaje de usuarios satisfechos para el servicio de streaming.

correctamente recibidos en bursts parcialmente erróneos. La Figura 10 muestra la función de densidad acumulativa (CDF) del número de secciones MPE de información correctamente recibidas en bursts erróneos. Se puede observar que aproximadamente la mitad de los bursts erróneos contienen algunos paquetes IP correctos. De los resultados obtenidos se puede por lo tanto argumentar que la tasa de bursts erróneos no refleja fielmente la QoS percibida por los usuarios, y que deben ser considerados diferentes criterios.

Por último en la Figura 11 se muestra el porcentaje de usuarios que reciben un fichero (probabilidad de adquisición) de distintos tamaños de fichero frente al número de bursts transmitidos usando AL-FEC. La probabilidad de adquisición crece al aumentar el número de bursts transmitidos, disminuyendo la capacidad efectiva al transmitir más bursts con información de paridad. Sin embargo lo más importante es observar que es posible alcanzar un porcentaje de usuarios satisfechos mucho mayor que para servicios de streaming.

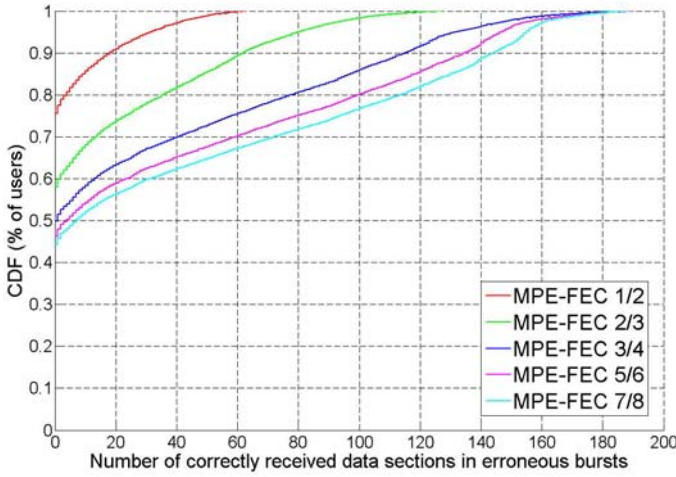


Fig. 10: CDF del número de paquetes IP correctamente recibidos en bursts erróneos.

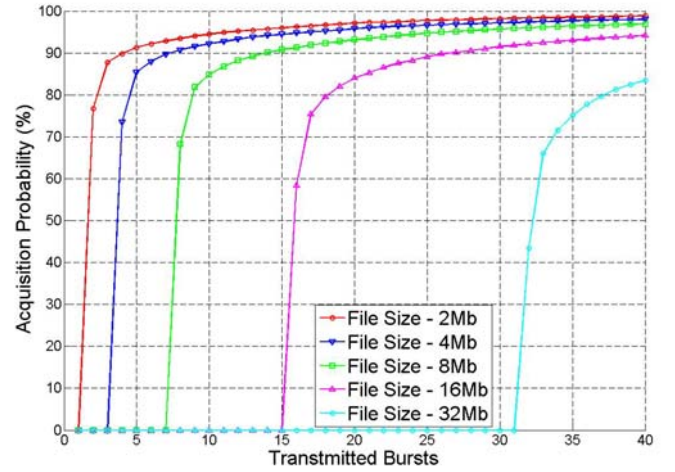


Fig. 11: Probabilidad de adquisición del fichero en función del número de bursts transmitidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio dentro del Proyecto FURIA (Futura Red Integrada Audiovisual) en el marco del Programa Plan Avanz@, www.furiapse.com, y ha sido realizado dentro de la acción europea COST 2100, www.cost2100.org.

REFERENCIAS

- [1] G. Faria, J. A. Henriksson, E. Stare, and P. Talmola, "DVB-H: Digital Broadcast Services to Handheld Devices," *Proc. of the IEEE*, vol. 94, no. 1, pp. 194-209, January 2006.
- [2] www.dvb-h.org/services.
- [3] ETSI, TS 102 472 v1.2.1, "Digital Video Broadcasting; IP Datacast over DVB-H: Content Delivery Protocols," December 2006.
- [4] P. I. Bratanov and E. Bonek, "Mobility Model of Vehicle-Borne Terminals in Urban Cellular Systems," *IEEE Transactions Vehicular Technology*, vol. 52, no. 4, pp. 947-952, July 2003.
- [5] D. Milanesio *et al.*, "Wing TV Network Issues," Celtic Wing TV project report, May 2006. Available online: <http://projects.celtic-initiative.org/WING-TV/>
- [6] ETSI, TR 102 377 v1.3.1, "Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines," May 2007.
- [7] J. Poikonen, J. Paavola, and V. Ipatov, "Finite-State Models for Simulating the Packet Error Behavior of a Mobile Broadcasting System Operating in a Multi-Path Channel Environment," *Handbook of Mobile Broadcasting*, CRC Press, 2008.
- [8] J. Poikonen, J. Paavola, and V. Ipatov, "Aggregated Renewal Markov Processes with Applications in Simulating Mobile Broadcast Systems," *to appear in IEEE Transaction on Vehicular Technology*, November 2008.
- [9] J. Poikonen and D. Gómez-Barquero, "Validation of a DVB-H Dynamic System Simulator using Field Measurements," *Proc. IEEE Broadband Multimedia*, Las Vegas, USA, 2008.