

INTELVIA: Plataforma Inalámbrica Multi-Tecnología para la Señalización, Seguridad y Gestión de Infraestructuras Viales

Sara Hernández, Héctor Moner, Javier Gozalvez, Ernesto Armada, David de la Fuente y Miguel Sepulcre

Uwicore, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, <http://www.uwicore.umh.es>,
Universidad Miguel Hernandez de Elche, Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche, España,
j.gozalvez@umh.es

Abstract — Cooperative communication technologies are enabling a new set of Intelligent Transport Systems (ITS) solutions to improve road safety and traffic management, and reduce the environmental and energy impact of road transport. In this context, the INTELVIA project proposes a novel road signaling system based on multi-hop IEEE 802.15.4 wireless communications, and that is being designed to allow for a more dynamic and efficient traffic management. This paper presents the system architecture, the design of the multi-hop wireless road signaling solution, and the implementation of a multi-technology on board unit compliant with the European ITS wireless communications architecture. In addition, the paper presents results from field tests conducted to validate the capabilities of the communication technologies adopted in INTELVIA to successfully transmit road signals to vehicles under realistic operating conditions.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas inteligentes de transporte (ITS, *Intelligent Transportation Systems*) buscan mejorar la seguridad y gestión vial, y reducir el impacto medioambiental y energético del transporte en carretera a través del uso de tecnologías TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación). En este contexto, conviene destacar la aparición, fuerte apoyo institucional e iniciativas de investigación puestas en marcha para el desarrollo de los futuros sistemas ITS cooperativos, los cuales posibilitarán una notable mejora en la seguridad vial y una gestión más dinámica del tráfico gracias al intercambio de información entre vehículos (V2V, *Vehicle to Vehicle Communications*), y entre vehículos y nodos de infraestructura (V2I, *Vehicle to Infrastructure Communications*).

Una de las principales iniciativas a nivel nacional para el desarrollo de los sistemas ITS cooperativos es el proyecto INTELVIA (<http://www.intel-via.org>), el cual está trabajando en la creación de un nuevo sistema de señalización vial inalámbrico que permita una gestión más dinámica y variable del tráfico de forma ubicua, y la implementación de una plataforma de comunicaciones vehiculares multi-tecnología de acuerdo a la arquitectura ITS cooperativa definida en el Comité Técnico ITS del ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) [1]. La red de señalización inalámbrica propuesta por INTELVIA es constituida por una red mallada de nodos de comunicación inalámbrica de bajo coste y consumo que transmitirán la información de señalización a los vehículos, y podrán ser controlados y configurados remotamente desde el centro de control, posibilitando de esta forma una gestión dinámica y contextual de la señalización vial. La red de señalización integrará también nodos cooperativos basados en el estándar ITS-G5/IEEE 802.11p para aplicaciones que requieran de mayor rango de transmisión, y de una inteligencia y capacidad computacional que no sea posible desarrollar en los nodos de bajo coste. Por ello, la plataforma vehicular multi-tecnología que está siendo desarrollada en INTELVIA dispone de diferentes interfaces de comunicación para ser capaz de transmitir y recibir información de los distintos nodos desplegados a lo largo de la red vial. En este contexto, el artículo presenta la plataforma vehicular multi-tecnología y la red de señalización inalámbrica propuestas en INTELVIA, así como resultados de distintas pruebas de campo llevadas a cabo para analizar el rendimiento vehicular de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas sobre las que se basa el sistema INTELVIA.

II. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN INALÁMBRICA DE INTELVIA

La Fig. 1 presenta la arquitectura general del sistema de señalización vial inalámbrica que está siendo desarrollado en el marco del proyecto INTELVIA. Dicho sistema está formado por distintos tipos de nodos desplegados a lo largo de la red vial con el fin de posibilitar las comunicaciones Vehículo a Infraestructura (V2I). En concreto, el sistema propuesto en INTELVIA consta de nodos cooperativos (RSU, *Road Side Unit*) basados en el estándar europeo ITS-G5A, una adaptación europea del estándar IEEE 802.11p [2] para entornos vehiculares, y una red *multi-hop* de nodos IEEE 802.15.4 [3] denominados Motes de Señalización Inalámbrica (MSI). Mientras que los nodos cooperativos permitirán comunicaciones de mayor distancia, además de implementar un mayor número de aplicaciones de seguridad vial, gestión de tráfico, e *infotainment*, los nodos MSI tendrán como principal función el envío de información de señalización. Es importante destacar que el reducido coste de los nodos basados en la tecnología IEEE 802.15.4 con respecto a aquellos que utilizan IEEE ITS-G5/802.11p permitiría un mayor despliegue de nodos MSI, y por lo tanto una mayor capacidad de implementar el sistema de señalización dinámica y variable que propone INTELVIA a través del uso de las comunicaciones inalámbricas.

Dentro de la red *multi-hop*, el Periférico Mote Señalización Inalámbrica (PMSI) permite el intercambio de datos entre el GRSI (Gestor de Red de Señalización Inalámbrica) y los MSIs. El GRSI es el nodo de la red que integra toda la inteligencia necesaria para controlar el estado de los dispositivos del sistema de señalización inalámbrico, detectar y localizar cualquier anomalía, e intercambiar información con el centro de control por medio de una conexión a través de los dispositivos ERU (Estaciones Remotas Universales) desplegados en la vía. La ERU es el equipo actualmente utilizado para gestionar y supervisar los controladores locales instalados en las vías (estaciones de toma datos, paneles de mensaje variable, cámaras y sensores de variables atmosféricas en carretera). La comunicación con el centro de control será realizada a través del servicio de comunicación en modo transparente definido en la norma nacional UNE 199011 que especifica los protocolos de comunicaciones entre el centro de control y la ERU, y entre la ERU y los controladores locales. El cumplimiento de dicha normativa en el sistema INTELVIA posibilitará que la ERU considere el GRSI como un controlador local más desplegado a lo largo de la infraestructura vial.

Dentro de la arquitectura INTELVIA, el centro de control será el encargado de gestionar y monitorizar la red de señalización vial electrónica inteligente mediante el establecimiento de un enlace *backhaul* con las ERU. Dicho enlace podría implementarse utilizando redes de fibra óptica, o comunicaciones inalámbricas de tipo GPRS/UMTS o WiMAX (opción que está siendo implementada en INTELVIA). Por último, es importante destacar que ante la posibilidad de tener que limitar la dimensión de cada red *multi-hop* de nodos MSIs, INTELVIA contempla la posibilidad de que un nodo GRSI controle distintas sub-redes *multi-hop* de nodos MSI a través de los nodos ERMSI (Enlace Red Mote Señalización Inalámbrica) y su correspondiente periférico PERMSI (Periférico Enlace Red Mote Señalización Inalámbrica PERMSI).

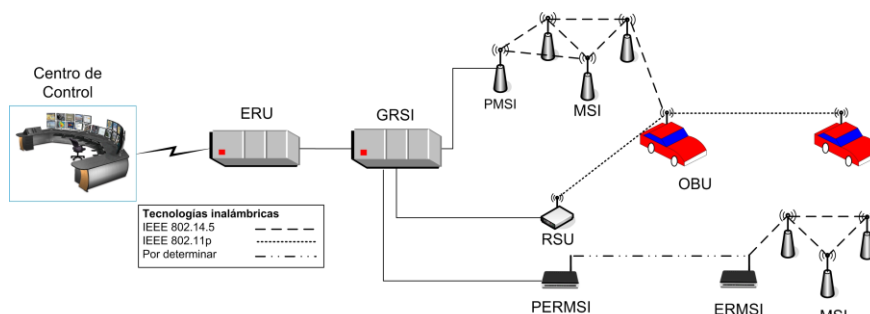


Figura 1. Arquitectura general del sistema de señalización de INTELVIA.

III. PLATAFORMA DE COMUNICACIONES ITS COOPERATIVAS

El sistema INTELVIA incorpora las tecnologías ITS cooperativas actualmente en desarrollo para posibilitar las comunicaciones V2V y V2I. En concreto, Intelvia está desarrollando prototipos de OBU (*On Board Unit*) y RSU que permitirán el intercambio de información de señalización entre la infraestructura y los vehículos. La RSU cooperativa está basada en el estándar europeo ITS-G5, mientras que la OBU incorporará además de una interfaz ITS-G5, la necesaria interfaz IEEE 802.15.4 para la recepción de la información de señalización a través de los nodos MSI.

A. Estándar de comunicaciones cooperativas ITS-G5

El estándar ITS-G5 [4] está siendo desarrollado por el ETSI para posibilitar las comunicaciones V2V y V2I en la banda de 5.9GHz. Este estándar comprende tanto la adaptación de las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC) definidas en el estándar IEEE 802.11p a la normativa europea, como las capas superiores de la arquitectura (transporte, red, facilites, aplicaciones, seguridad y gestión) que incorporan importantes funcionalidades de control que garantizan la robustez, eficiencia y seguridad de las comunicaciones V2V y V2I. El estándar europeo especifica unos rangos de frecuencia denominados G5A, G5B y G5C, siendo la banda G5A (5,875-5,905 GHz) la destinada a aplicaciones ITS relacionadas con la seguridad y gestión de tráfico, y la que utilizarán los equipos de comunicaciones cooperativas de INTELVIA. La capa PHY de ITS-G5A define tres canales, un canal de control (CCH) y dos canales de servicio (SCH1 y SCH2). Hasta la fecha, se han definido 3 tipos de mensaje para realizar el intercambio de información V2V, I2V y V2I (implementados en las plataformas hardware de INTELVIA):

- *Cooperative Awareness Message (CAM)*: emitidos en modo broadcast con una frecuencia entre 1-10 Hz, y utilizados para proporcionar a otros vehículos información del estado del vehículo emisor, como por ejemplo la posición geográfica, tipo de vehículo o su velocidad.
- *Decentralized Environment Notification Message (DENM)*: empleados para informar a los vehículos situados en una zona concreta de la existencia de un evento especial que puede afectar a su seguridad, por ejemplo un accidente u obras.
- *Service Announce Message (SAM)*: anuncian la existencia de servicios disponibles en los canales de servicio.

Aunque el uso específico de los diferentes canales todavía no ha sido publicado en los estándares, siguiendo las propuestas actualmente bajo consideración en el ETSI y proyectos similares, se utilizará el CCH para la emisión de mensajes de corto alcance y alta prioridad, la emisión de mensajes SAM y el primer salto en mensajes V2V *multi-hop*. El SCH1 se destinará a mensajes de baja prioridad y mensajes V2V *multi-hop*, mientras que el SCH2 se utilizará para la comunicación con la RSU.

B. Arquitectura Hardware

La plataforma a bordo del vehículo diseñada en INTEL VIA integra diferentes tecnologías de comunicación que permitan a la OBU el intercambio de información, no sólo con los equipos cooperativos, sino también con la red de señalización (IEEE 802.15.4) y el centro de control si fuera necesario (UMTS). El OBU incorpora también un Interfaz Hombre-Máquina (IHM) para la interacción con el conductor en base a las aplicaciones que se están desarrollando en el proyecto. La Fig. 2 muestra la arquitectura hardware de la OBU, donde el elemento central de la misma es un ordenador que sirve como punto de conexión entre diferentes periféricos, los cuales dotan a la plataforma vehicular de las funcionalidades necesarias de comunicación, adquisición y visualización de datos. Las funcionalidades de adquisición de datos hacen uso del GPS y del bus CAN del vehículo (en el caso del proyecto INTEL VIA se utiliza un emulador de bus CAN). El GPS es conectado al ordenador a través de un puerto USB o RS-232 para extraer no sólo la posición del vehículo, sino también otros parámetros de interés en la conducción como la velocidad o la dirección. El emulador de bus CAN proporciona información sobre los múltiples sensores existentes en el vehículo, para lo cual utiliza un protocolo de comunicaciones serie que soporta control distribuido en tiempo real con un alto nivel de seguridad y multiplexación, siendo necesario el uso de un adaptador CAN-USB para conectarlo al ordenador. La visualización de los datos e interacción del conductor se lleva a cabo mediante una pantalla táctil (IHM).

Para comunicar la OBU con otros vehículos, la infraestructura y el centro de control se utilizan tres dispositivos con diferente tecnología. El dispositivo utilizado en las comunicaciones cooperativas incorpora las capas PHY y MAC IEEE 802.11p, e integra un ordenador monoplaca con diversas interfaces de comunicación (Ethernet, RS-232, USB, etc.) y dos módulos radio IEEE 802.11p. A pesar de que este equipo proporciona un sistema operativo que permite el desarrollo de aplicaciones, la complejidad y variedad de funcionalidades a integrar en el sistema INTEL VIA ha resultado en que el dispositivo IEEE 802.11p sea utilizado únicamente como periférico de comunicación, mientras que la inteligencia de control y aplicaciones de la OBU son implementadas en el ordenador. El Mote de Señalización Vehicular (MSV) es un dispositivo con tecnología IEEE 802.15.4 integrado en la OBU, y que actúa como interfaz entre el ordenador y los nodos de señalización MSI. Finalmente, se prevé el uso de un terminal móvil (celular) que mediante el uso de tecnologías celulares (UMTS/GPRS) permitirá establecer una comunicación ‘directa’ con el centro de control.

La arquitectura hardware empleada en la RSU (Fig. 3) es muy similar a la de la OBU, sólo que en este caso se eliminan aquellos periféricos cuyas funcionalidades no son necesarias ya que la RSU únicamente incorpora comunicaciones basadas en el estándar ITS-G5/IEEE 802.11p. El elemento central de la misma es también un ordenador al que se conecta el equipo de comunicaciones cooperativas y el GRSI (la localización y comunicaciones con centro de control son llevadas a cabo por el GRSI). Con el objetivo de facilitar el desarrollo, la RSU y el GRSI son implementados en diferentes ordenadores.

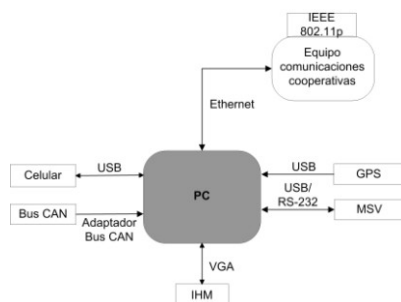


Figura 2. Arquitectura hardware OBU.

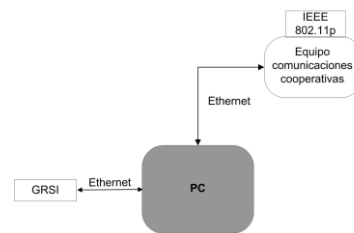


Figura 3. Arquitectura hardware RSU.

C. Arquitectura Software

El Comité Técnico ITS del ETSI define la arquitectura software de cualquier tipo de estación ITS cooperativa. Esta arquitectura es una adaptación del modelo de referencia OSI (Fig. 4), en la que la capa de tecnologías de acceso gestiona la capa física y de enlace, y la capa de red y transporte es la encargada de encaminar los paquetes hacia su destino. ETSI introduce una capa de *facilities* que incluye una serie de funcionalidades cuyo objetivo es dar soporte tanto a las aplicaciones cooperativas como a las funciones de comunicación cooperativas integradas en las capas de acceso, red y transporte. Una de las principales funcionalidades de la capa de *facilities* es el LDM (*Local Dynamic Map*) que permite a cada vehículo disponer de información actualizada sobre su contexto vehicular. Por último, las capas transversales, relacionadas con la seguridad y la gestión de comunicaciones, pueden ofrecer sus servicios a todas las capas longitudinales.

La arquitectura ITS cooperativa definida en el marco de ETSI considera la posibilidad de transmitir a través de diferentes tecnologías de acceso radio, así como emplear en la capa de red y transporte el protocolo IP o un protocolo de menor latencia para las comunicaciones vehiculares. En este contexto, es necesaria la implementación de las funcionalidades de *facilities* y aplicaciones independiente de las tecnologías de comunicación empleadas. Tras un análisis de los principales proyectos cooperativos europeos [5][6][7] y de las ventajas de las distintas plataformas software existentes, INTEL VIA ha optado por implementar la OBU y RSU utilizando la plataforma de servicios OSGi (*Open Services Gateway initiative*). OSGi es un sistema modular dinámico sobre Java (independiente del sistema operativo gracias al uso de la máquina virtual de Java), en el que se establece la forma de crear módulos (aplicaciones y servicios), y definir la manera en que éstos interactúan entre sí en tiempo de ejecución. Al ser un sistema modular, OSGi permite reducir la complejidad de las aplicaciones a desarrollar ya que

los módulos pueden ofrecer sus servicios al resto por medio de una interfaz. Además permite un desarrollo en paralelo de los diferentes módulos y facilita las posibles modificaciones en su implementación, pues los cambios no afectan al resto de los módulos. Otra ventaja que proporciona la plataforma es la posibilidad de instalar nuevas funcionalidades o módulos (de forma local o remota) sin necesidad de reiniciar la plataforma.

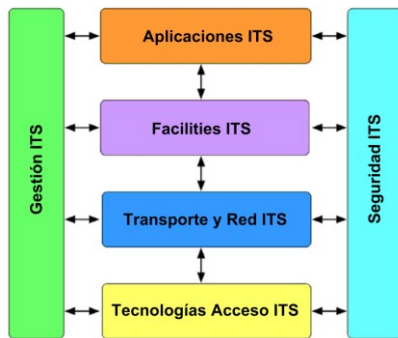


Figura 4. Arquitectura ITS cooperativa.



Figura 5. Arquitectura software plataforma INTEL VIA.

La Fig. 5 presenta la arquitectura software de la plataforma INTEL VIA; en concreto, la figura muestra la arquitectura empleada en la implementación de la OBU que requiere de un mayor número de interfaces de comunicaciones que la RSU en el marco del proyecto INTEL VIA. En ella se aprecia como la Unidad de Aplicación (AU), compuesta por la capa de *facilities* y la capa de servicios, utiliza el entorno de ejecución ofrecido por la plataforma OSGi, la cual se ejecuta sobre la máquina virtual de Java. La Unidad de Control y Comunicación (CCU), formada por las capas de acceso, red y transporte, ha sido implementada en el lenguaje de programación C y se ejecuta directamente sobre el sistema operativo, concretamente Ubuntu 10.04, una distribución de Linux. El *Java Native Interface* (JNI) es una interfaz de Java que permite establecer una comunicación directa entre la AU y las funciones nativas del sistema operativo.

D. *Facilities y Aplicaciones cooperativas implementadas en INTEL VIA*

El estándar europeo [8] define las tres clases de aplicaciones que deben implementar las OBUs y las RSUs: aplicaciones de seguridad cooperativa en carretera, aplicaciones de gestión cooperativa de tráfico, y otras aplicaciones (como por ejemplo, de entretenimiento o basados en localización). En una primera versión de la plataforma cooperativa de INTEL VIA, se han seleccionado dos casos de uso (escenarios concretos de ejecución de aplicaciones) relacionados con la gestión cooperativa del tráfico que hacen uso del envío de información de señalización desde la infraestructura a los vehículos: “Señalización Vehicular” (SV) y “Notificación de regulación del límite de velocidad” (NRLV). En esta clase de aplicaciones, la RSU anuncia el servicio mediante un SAM. La OBU procesa el mensaje y activa la escucha en el canal de servicio indicado por la RSU para recibir la información pertinente. Las *facilities* a implementar tanto en la OBU como en la RSU son las mostradas en la Fig. 3. Las *facilities* de gestión de CAM, DENM y SAM se encargan de la creación y procesado de dichos mensajes. La *facility* “Posición de la Estación” trata la información de posición recibida de un GPS y permite que esté disponible en la plataforma, mientras que la “Gestión LDM” permite escribir o realizar consultas en la base de datos LDM, en la cual se almacena información detallada sobre el entorno vehicular y contexto de tráfico del vehículo; dicha información es extraída de los mensajes cooperativos que recibe un vehículo. La “Gestión de comunicación IEEE 802.11p” es una interfaz de intercambio de mensajes con el equipo de comunicaciones cooperativas, mientras que “Gestión de mensajes” se encarga de identificar el tipo de mensaje cooperativo recibido y enviarlo a la *facility* de gestión correspondiente. Finalmente, la información a mostrar en el IHM y su control es llevado a cabo por el “Soporte IHM”.

El caso de uso NRLV, perteneciente a la aplicación Gestión Cooperativa de la Velocidad, se basa en que la RSU retransmite periódicamente el límite de velocidad indicado desde el centro de control a los vehículos de la vía. Para ello, la RSU envía de forma periódica un mensaje SAM con información del tipo de servicio que ofrece y el perfil de comunicaciones necesario para recibir esta información (potencia, canal, velocidad de transmisión, etc.). La OBU interesada en este servicio cambiará el perfil de comunicaciones al indicado en el mensaje SAM. La RSU enviará en el canal de servicio indicado en el perfil de comunicaciones, un mensaje CAM conteniendo la información del límite de velocidad de la vía, la posición en la cual finaliza y la distancia a la que se inicia la notificación al conductor. La OBU recibirá este mensaje a través de “Gestión de comunicación IEEE 802.11p” y “Gestión de mensajes” lo identificará como un CAM. La información contenida en este mensaje CAM será tratada por la *facility* “Gestión CAM”, que será insertada en las tablas correspondientes de la base de datos del LDM, utilizando la *facility* “Gestión LDM”. El caso de uso obtendrá información de la posición del vehículo de la *facility* “Gestión de posición”. Cuando el vehículo esté a la distancia indicada de la posición final de la señal, hará uso de la *facility* “Gestión IHM” para mostrarle al conductor el límite de velocidad indicado hasta dicha posición final. Una vez superado este punto, el límite de velocidad dejará de ser válido, por lo que dejará de mostrarse y se eliminará de la tabla correspondiente de la base de datos LDM, finalizando así el caso de uso NRLV.

En el caso de uso SV perteneciente a la aplicación Navegación Cooperativa, la RSU envía periódicamente mensajes SAM indicando el tipo de servicio que ofrece a los vehículos de la carretera y el perfil de comunicaciones necesario para su recepción. En la plataforma vehicular se gestiona el mensaje SAM recibido, extrayendo la información de identificador del

servicio y el perfil de comunicaciones. La plataforma vehicular interesada en este tipo de servicio activará el perfil de comunicaciones para la recepción de la información de la RSU. Desde la RSU se enviará un mensaje DENM con la información relativa a la señalización de la vía, la posición final del evento y la distancia a partir de la cual tendrá que ser notificada al conductor. En la OBU se recibirá este mensaje a través de la *facility* “Gestión Comunicaciones IEEE 802.11p”, siguiendo el mismo proceso explicado anteriormente en el caso de uso NRLV, solo que en este caso es la *facility* “Gestión DENM” la encargada de procesar el mensaje y almacenar la información en la base de datos LDM.

Aunque estos casos de uso han sido descritos utilizando las comunicaciones cooperativas ITS-G5/IEEE 802.11p, los dos casos de uso pueden ser ejecutados mediante otras tecnologías de comunicaciones. En el caso de INTEL VIA, se está actualmente definiendo e implementando nuevas *facilities* para el procesamiento de mensajes recibidos mediante la tecnología IEEE 802.15.4 si bien se está intentando reutilizar todas aquellas *facilities* ya definidas para las comunicaciones cooperativas basadas en ITS-G5/IEEE 802.11p. Esto permitirá que los casos de uso NRLV y SV puedan ejecutarse independientemente de la tecnología utilizada para recibir la información de señalización.



Figura 6. Escenario prueba 1.

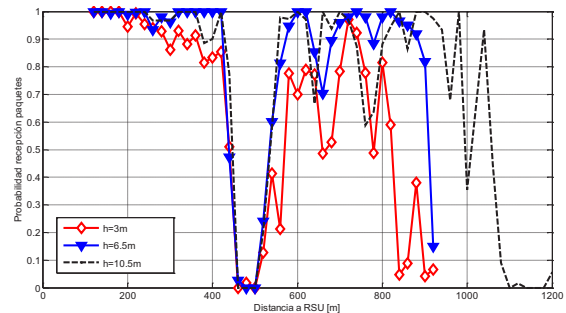


Figura 7. Probabilidad recepción en función de la distancia a la RSU.

E. Pruebas de Campo

Con el fin de analizar el rendimiento alcanzable con las tecnologías cooperativas ITS-G5/IEEE 802.11p, se ha realizado una campaña de medidas de comunicaciones I2V que ha permitido caracterizar los niveles de señal recibida, y obtener estadísticas de probabilidad de recepción de paquetes bajo diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos ofrecen valiosa información para la planificación de estrategias de despliegue de nodos RSU en la infraestructura vial. Las pruebas realizadas han sido llevadas a cabo utilizando dos RSUs y una OBU. Cada uno de estos equipos utiliza el prototipo de comunicaciones IEEE 802.11p utilizado en INTEL VIA configurado para la transmisión y recepción de paquetes en modo broadcast. La interfaz radio de cada unidad de comunicaciones es conectada a una antena externa: en el caso del OBU, la antena externa está situada en el techo del vehículo y está conectada mediante un cable de 3m que introduce unas pérdidas de 2dB, mientras que en el caso de la RSU, la antena se sitúa en lo alto de un mástil neumático telescópico con una altura máxima de 10,5m, y utiliza un cable de conexión de 14m de longitud y 5dB de pérdidas. La OBU registra su posición geográfica utilizando un receptor GPS configurado para emplear un filtro PDP, específicamente diseñado para mejorar la disponibilidad de la señal GPS ante la presencia de árboles, puentes, etc. El software desarrollado para la campaña de medidas configura los nodos RSU y OBU para que transmitan periódicamente un paquete (*Data Frames* IEEE 802.11p) en modo broadcast cada 0.1s en el canal de control (canal 178), empleando una potencia de 20dBm y el modo de transmisión de 6Mbps. El paquete incluye en su *payload* (76 bytes), un identificador del nodo emisor, información de posición como la latitud, longitud, altura, velocidad, etc., datos de relleno y un número de secuencia utilizado para identificar a cada uno de los paquetes recibidos y calcular la probabilidad de recepción.

La Fig. 6 muestra uno de los escenarios urbanos utilizado para analizar el rendimiento de comunicaciones I2V cooperativas. El escenario es una avenida de 4 carriles completamente recta, en la que existen edificios en ambos lados de la vía, y una rotonda con vegetación y algunos árboles pequeños entre 450m y 500m de la RSU. En este tramo, la OBU pierde la visión directa con la RSU. La Fig. 6 representa el recorrido realizado por la OBU (iniciado a 1200m de la RSU), y la posición de la RSU representada con un círculo rojo. La Fig. 7 muestra la probabilidad de recepción de paquetes experimentada en función de la distancia a la RSU para tres alturas diferentes de la antena RSU. Como se puede observar, el rango de transmisión aumenta con la altura de la RSU ya que la señal puede superar las obstrucciones producidas por la vegetación de la rotonda y el tráfico. No obstante, la rotonda crea una zona con conectividad limitada alrededor de los 500m que no puede ser superada a pesar de incrementar la altura de la antena de la RSU, si bien la comunicación I2V es recuperada con mayor robustez al superar la rotonda con las mayores alturas de la antena RSU. Es importante destacar que el rango de transmisión hacia una dirección llegó a alcanzar los 900 metros en este escenario, lo cual indica que en trazados rectos, es posible conseguir una cobertura I2V cooperativa adecuada con un despliegue limitado de RSUs.

Durante la segunda prueba fueron utilizadas de forma simultánea las dos RSUs (RSU1 y RSU2); cada una de ellas fue situada a un lado de una avenida de 6 carriles (3 en cada sentido), con una mediana que presenta un arbolado frondoso y de gran altura. La avenida presenta un tramo recto de más de 800m en la dirección norte desde la RSU1 donde los árboles de la

mediana cubren parcialmente la carretera. El trayecto y la localización de las RSUs son mostrados en la Fig. 8, donde la RSU1 y la RSU2 son representadas mediante un círculo rojo y uno blanco, respectivamente. La OBU inicia la aproximación a la RSU1 a una distancia de 800m. La flecha representada en el plano tiene una longitud de unos 400m teniendo en cuenta la escala de la imagen. Ante la presencia de árboles que obstaculizan la propagación de la señal radio cabe esperar que el rango de transmisión sea reducido a medida que aumenta la altura de la antena RSU. La Fig. 9 muestra que efectivamente la reducción de la altura de la antena RSU1 puede producir alrededor de 150 metros de ganancia de alcance de transmisión. En el lado opuesto de la avenida, se obtiene una ganancia similar cuando la altura de la antena de la RSU2 pasa de 10.5m a 6.5m. Sin embargo, los rangos de transmisión de la RSU2 son considerablemente menores a los de la RSU1 debido a la presencia de árboles en la mediana. Comparando los enlaces OBU-RSU1 y OBU-RSU2 para una altura de 10,5m, podemos concluir que los árboles situados en la mediana de la avenida reducen el rango de transmisión en torno a 250m.



Figura 8. Escenario prueba 2.

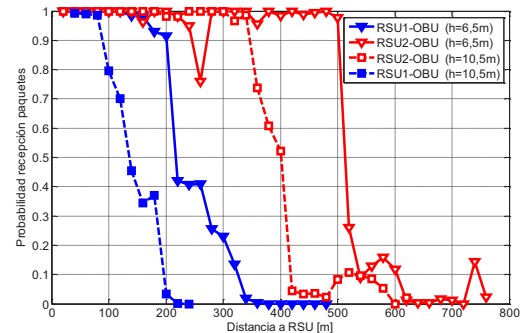


Figura 9. Probabilidad recepción en función de la distancia a las RSUs.

IV. RED MULTI-HOP DE SEÑALIZACIÓN INALÁMBRICA

Una de las principales innovaciones que propone INTEL VIA es el despliegue de una red de señalización vial inalámbrica formada por dispositivos inteligentes de bajo coste y consumo que transmiten a los vehículos mensajes de señalización. Estos dispositivos son desplegados en forma de red mallada para permitir su interconexión y acceso remoto desde el centro de control a través de un nodo pasarela o gateway. De esta forma, el centro de control puede controlar su estado y modificar la información de señalización a enviar de forma dinámica y en base al contexto de tráfico con el fin de posibilitar una gestión más eficiente de las infraestructuras viales. La red *multi-hop* de señalización inalámbrica está siendo construida utilizando motes de comunicación IEEE 802.15.4 dado su bajo coste y consumo. Los nodos RSU basados en comunicaciones ITS-G5/ IEEE 802.11p son utilizados de forma complementaria en la red de señalización para aquellas aplicaciones que requieran de un mayor rango de comunicación, o que necesiten de una mayor inteligencia y capacidad de computación y no puedan pues ser implementados en los motes IEEE 802.15.4.

A. Red Multi-Hop de Señalización

La tecnología IEEE 802.15.4, que únicamente especifica las capas PHY y MAC, define dos clases de dispositivos: *Reduced Function Devices* (RFDs) y *Fully Functional Devices* (FFDs). Los FFDs tienen la capacidad de comunicar con cualquier dispositivo de la red que esté dentro de su alcance, mientras que los RFDs sólo son capaces de comunicarse directamente con FFDs. En todas las redes existe un nodo FFD, conocido como coordinador PAN, que se encarga de iniciar la formación de la red y coordinarla. El estándar establece también dos modos de funcionamiento a la hora de transmitir datos: modo con beacons y modo sin beacons. En una red sin beacons, los dispositivos se comunican entre ellos en cualquier instante de tiempo, utilizándose el mecanismo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA) para regular el acceso al medio de transmisión. Por el contrario, en una red con beacons el nodo coordinador PAN periódicamente transmite un mensaje con un formato específico (beacon), que es utilizado para sincronizar los nodos de una red y determinar el instante en el que deben realizar la transmisión.

La red de señalización de INTEL VIA estará inicialmente formada por FFDs de forma que todos los MSIs emitirán mensajes de señalización en modo broadcast de forma periódica, los cuales serán recibidos por el MSV de la OBU, que realiza una escucha continua. Además, los MSIs que se encuentren dentro del rango de transmisión podrán comunicarse directamente entre ellos (topología de red mallada) con el fin de encaminar paquetes de datos hacia la pasarela o *gateway* con centro de control, o intercambiar información con el centro de control. Esta solución puede implementarse haciendo uso de la pila de protocolos de código abierto proporcionada por TinyOS, la cual implementa la capa de red, transporte y aplicaciones de acuerdo a las especificaciones IEEE 802.15.4. Tras esta primera implementación se han diseñado una serie de mejoras para optimizar el consumo energético, fiabilidad y robustez de la red de señalización, incluyendo la implantación de un protocolo de sincronismo que permita tanto activar como pasar los MSIs a modo de bajo consumo de forma unísona, lo que permitirá reducir el consumo energético, alargando la vida útil de las baterías o reducir los requisitos de la fuente de alimentación autónoma. Otra posibilidad que está siendo analizada para reducir el consumo energético y mejorar la robustez en la transmisión de datos dentro de la red mallada de señalización es el desarrollo de un protocolo de agregación de datos que permita minimizar el

número de paquetes intercambiados en la red *multi-hop*. La red de señalización INTELVIA incorporará también un protocolo de encaminamiento de los datos que varíe la ruta que siguen los paquetes dentro de la red de señalización con el fin de homogeneizar el consumo energético de los nodos.

Un componente de gran importancia en la red de señalización *multi-hop* es el GRSI. Este equipo soporta gran parte de la inteligencia de la red de señalización: permitir al CC configurar la señales viales que los MSI envían a las OBU, monitorizar el estado de todos los MSIs de la red, y en el caso de implementar la comunicación V2I en los MSIs, agrupar la información que éstos han recolectado para enviarla al CC. Para llevar a cabo estas tareas de monitorización y configuración de MSIs, el CC siempre consultará (monitorización) o modificará (configuración) la información en la base de datos del GRSI. Por su parte, el GRSI se encargará de mantener actualizadas las tablas de monitorización y enviar a los MSIs su nueva configuración en el caso de que el CC la haya modificado. Es importante también destacar que con el fin de facilitar una futura integración del GRSI y RSU cooperativa, el nodo GRSI está siendo implementado utilizando la plataforma OSGi.

B. Comunicaciones IEEE 802.15.4 en entornos vehiculares

Para la implementación de la red *multi-hop* de señalización se han analizado (incluso con pruebas de campo) distintos motes existentes en el mercado. Tras analizar sus características en cuanto a potencia de transmisión, consumo, alcance, uso de antena externa, frecuencia de trabajo, antecedentes de pruebas a alta velocidad, y accesibilidad de la pila de protocolos implementada, el proyecto INTELVIA ha decidido implementar la red de señalización *multi-hop* utilizando el mote IRIS de Memsic a 2.4GHz. Tras la elección del dispositivo de comunicaciones, se ha realizado una exhaustiva campaña de medidas para analizar la calidad de las comunicaciones en diferentes escenarios y condiciones de operación que permitan validar la eficacia de esta tecnología en entornos vehiculares, caracterizados por requerir una comunicación fiable con nodos que se desplazan a gran velocidad. Si bien es cierto que existen varios estudios sobre la conectividad IEEE 802.15.4 [9][10][11], la mayoría han sido realizados en entornos controlados donde es difícil reproducir condiciones adversas de transmisión que podrían afectar al rendimiento y funcionamiento de la red de señalización inalámbrica.

Una de las pruebas realizadas tiene por objetivo analizar el efecto de la velocidad del nodo vehicular sobre el rango de transmisión y la ventana temporal disponible para realizar el intercambio de información entre mote y vehículo. En las pruebas realizadas se han utilizado dos motes IRIS (emisor y receptor) con antenas omnidireccionales. El nodo emisor, o nodo infraestructura, fue ubicado en un lado de la vía, y envía paquetes (*Data Frames* IEEE 802.15.4) periódicamente en modo broadcast. La potencia de transmisión utilizada es 3dBm, el tamaño del paquete (*payload*) es de 100 bytes y el periodo de emisión es de 27ms. El nodo receptor retransmite a un ordenador que actúa como *logger* de los paquetes recibidos, el cual guarda en memoria para cada paquete recibido, la hora de recepción, el número de secuencia del paquete (utilizado para el cálculo de la probabilidad de recepción), el nivel de señal recibida (RSSI) y el indicador de calidad del enlace (LQI) especificado en el estándar IEEE 802.15.4 [3]. Al mismo tiempo que se realiza la captura de paquetes radio, se registra la posición del nodo receptor mediante un dispositivo GPS del mismo modo que se hizo con las pruebas cooperativas. El escenario elegido para realizar estas pruebas es un tramo de la Autovía A-7 (Autovía del Mediterráneo) situado entre Elche y Alicante con curvas enlazadas y poco pronunciadas, donde el MSI consigue una línea de visión directa con el MSV, tal y como se puede observar en la Fig. 10. Este tramo, ubicado entre los puntos kilométricos 26 y 27, cuenta con dos sentidos de circulación y dos carriles (3,5m de ancho cada uno) por sentido separados por una mediana de 3 metros sin vegetación. En este escenario, el nodo MSI, marcado con un círculo blanco en la Fig. 10, está ubicado en un mástil neumático a una altura de 3 metros mientras que el nodo MSV, ubicado en la parte trasera del techo del vehículo, recorre el escenario en ambos sentidos de circulación, realizando dos pasadas para cada sentido a las velocidades de 90 y 120 Km/h. Para la representación de los resultados, se toma como punto de referencia (distancia cero) la posición del MSI. Se consideran distancias positivas cuando el vehículo se encuentra en la zona comprendida entre el MSI y el punto marcado con una 'A', y distancias negativas cuando se encuentra en la zona delimitada por el nodo emisor y la marca 'B'.

La Fig. 11 y Fig. 12 muestran la probabilidad de recepción en función de la distancia al MSI para dos velocidades del MSV distintas (90Km/h y 120 Km/h). La Fig. 11 contiene la pasada con dirección B→A y la Fig. 12 la pasada con dirección A→B. Como se puede apreciar, los rangos de transmisión conseguidos para velocidades distintas del MSV son muy similares, y alcanzan rangos superiores a 500 metros en cada dirección. A pesar de obtener rangos de comunicación similares para ambas velocidades, una menor velocidad permite una mayor ventana temporal de comunicación, y por lo tanto la posibilidad de intercambiar una mayor cantidad de información con el MSI. En esta prueba la ventana disponible en la dirección B→A a 90 Km/h es de 55s, mientras que a 120 Km/h este valor se reduce a 41s. En la dirección contraria (A→B), los rangos de transmisión conseguidos son menores, siendo la ventana temporal a 90 Km/h de 48s y de 36s a 120 Km/h. Si bien la ventana temporal de comunicación es reducida a altas velocidades, es importante destacar que es lo suficientemente amplia para permitir la transmisión de información de señalización del MSI al vehículo. La diferencia en el rango de transmisión observado según el sentido de la marcha es debido a que el tráfico de los carriles intermedios actúa como elemento obstructor, de manera que cuando el vehículo/MSV circula por el carril situado en el mismo lado de la vía que el MSI, el alcance de la comunicación es mayor que cuando circula por el lado contrario.



Figura 10. Escenario Autovía del Mediterráneo.

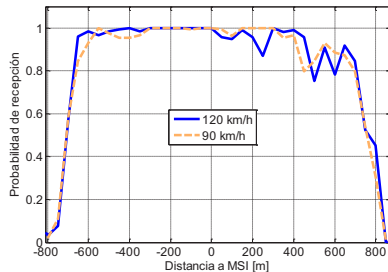


Figura 11. Probabilidad recepción sentido B->A

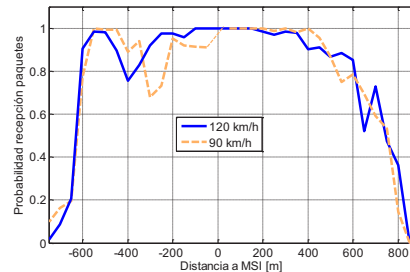


Figura 12. Probabilidad recepción sentido A->B

V. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado una novedosa red de señalización inalámbrica *multi-hop* de bajo coste basada en la tecnología de comunicaciones IEEE 802.15.4 propuesta en el proyecto INTELVA, y la arquitectura e implementación de una plataforma vehicular multi-tecnología capaz de intercambiar eficientemente información con la red *multi-hop* propuesta y con nodos de infraestructura cooperativos desplegados a lo largo de la infraestructura vial. Asimismo, se han presentado resultados obtenidos en diferentes campañas de medida que han demostrado la validez de las tecnologías de comunicación empleadas en entornos vehiculares, y analizado el efecto que distintos tipos de elementos obstructores pueden causar en las comunicaciones ITS cooperativas. Estos resultados serán de gran utilidad para la planificación y futuro despliegue tanto de la red de señalización como de los equipos cooperativos dentro del proyecto INTELVA.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio a través del proyecto INTELVA (número de referencia: TSI-020302-2009-90).

REFERENCIAS

- [1] ETSI EN 302 665, "Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture", Septiembre 2010.
- [2] IEEE 802.11p-2010, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Wireless Access in Vehicular Environments", Julio 2010.
- [3] IEEE 802.15.4, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", 2006.
- [4] ETSI ES 202 663, "Intelligent Transport Systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", Enero 2010.
- [5] PRE-DRIVE C2X "Deliverable D1.2 Refined Architecture", Febrero 2009.
- [6] E. Koenders, J. Vreeswijk. "Cooperative Infrastructure", *Proc. 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Eindhoven, Junio 2008.
- [7] H. Stübing, et al. "simTD: A Car-to-X System Architecture for Field Operational Tests", *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, Issue 5, pp. 148-154, Mayo 2010.
- [8] ETSI TR 102 638 V1.1.1. "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definition", Junio 2009.
- [9] B. Arief, et al., "Integrating Smartdust into Intelligent Transportation System", *Proc. of the 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation*, Atenas, 2008.
- [10] A. Festag, et al. "Vehicle-to-Vehicle and Road-side sensor communication for enhanced road safety", *Proc. of 9th International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, Montréal, 2008.
- [11] P. Melo, et al., "Interconnecting WSNs with Fast Moving Nodes: Experiments in Real-World Scenarios", *Proc. of Second International Workshop on Sensor Networks*, San Francisco, 2009.