

Evaluación del Rendimiento de LTE Mobile Relay Nodes en Entornos Ferroviarios de Alta Velocidad

Jaime Calle-Sanchez⁽¹⁾, Eduardo Martínez del Nido⁽¹⁾, Mariano Molina García⁽¹⁾, José I. Alonso⁽¹⁾

jcalles@gmr.ssr.upm.es, emartinez@gmr.ssr.upm.es, mmolina@gmr.ssr.upm.es, ignacio@gmr.ssr.upm.es

⁽¹⁾ Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. ETSIT, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España.

Abstract- El incremento del uso de móviles, portátiles y tabletas, ha conducido a un crecimiento exponencial de los servicios de datos en entornos móviles de alta velocidad. Dentro de este ámbito, el grupo de trabajo del 3GPP para la estandarización de LTE está prestando cada vez más atención a las comunicaciones en los entornos ferroviarios. Este grupo de estandarización está promoviendo la utilización de *Mobile Relay Nodes* para mejorar las prestaciones obtenidas en escenarios ferroviarios de alta velocidad. En este artículo, los autores investigan la mejora de la capacidad ofrecida por el *Mobile Relay* para los usuarios a bordo del tren y su impacto en el rendimiento global de la red.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el número de pasajeros en trenes de alta velocidad que demandan servicios de datos de banda ancha, se está incrementando debido a la alta tasa de penetración de los móviles, los portátiles y las tabletas. Los operadores de red ferroviarios y las empresas de telecomunicación han mostrado su interés en proporcionar acceso de datos en banda ancha a los pasajeros.

El actual sistema de comunicaciones ferroviario, GSM-R, ha demostrado ser bastante fiable, pero sólo puede dar soporte a las aplicaciones ferroviarias críticas de banda estrecha. Parece evidente que la industria ferroviaria tendrá que afrontar el proceso de migración del sistema GSM-R hacia un nuevo sistema de comunicaciones de banda ancha, como LTE [1]. Esta migración estará conducida por el reto de aumentar la capacidad de la red de comunicaciones para dar soporte a los servicios operativos no críticos. Estos servicios contribuyen a la reducción en los costes de operación y a la mejora de los resultados de explotación, a través de un sistema radio integrado. Es de esperar, que tanto el sistema GSM-R como el sistema LTE coexistan a medio plazo, puesto que el proceso de desarrollo de GSM-R todavía no está maduro. Un posible escenario a corto o medio plazo, incluye a los sistemas GSM-R para dar soporte a las comunicaciones ferroviarias críticas, mientras que los sistemas LTE suministrarían todos los servicios de comunicación no críticos, como por ejemplo el acceso a Internet de alta velocidad a bordo del tren o videovigilancia.

Desde el punto de vista de las telecom, sería más rentable extender las áreas de cobertura hasta las vías del tren, antes que tener que implementar caras y específicas redes ad-hoc. Sin embargo, ampliar dichas áreas de cobertura hasta las vías del tren mediante un simple incremento en la potencia transmitida, puede no ser la solución más idónea para ofrecer acceso a Internet de banda ancha a alta velocidad para los

usuarios a bordo del tren. Los entornos ferroviarios y vehiculares presentan una serie de particularidades y retos relacionados con la alta velocidad, que degrada gravemente la calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) de los pasajeros.

El grupo de trabajo del 3GPP a cargo de *Long Term Evolution* (LTE) ha propuesto un nuevo modelo de arquitectura para la red de acceso radio, para trenes y autobuses: el *Mobile Relay Node* (MRN) [2]. El MRN es un nodo de red dedicado que se situaría en la parte superior del vehículo para proveer de un enlace de acceso fijo a los pasajeros que se encontrasen a bordo del tren. En principio, esta arquitectura de acceso radio mejoraría las prestaciones de los sistemas inalámbricos ya existentes en escenarios ferroviarios de alta velocidad. La agregación de todas las conexiones de los pasajeros permitiría reducir la complejidad de los trasposos y el exceso de señalización, mejorando el rendimiento y la QoS de los usuarios [3].

Sin embargo, tanto el impacto de la carga total de tráfico de la celda en el rendimiento del MRN, como el del número de subtramas asignadas a los *relays*, todavía no han sido convenientemente evaluados. Una evaluación práctica de estos aspectos requiere del desarrollo de un simulador LTE a nivel de sistema. El simulador LTE desarrollado será utilizado no sólo para estudiar el rendimiento esperado del MRN, sino también para evaluar la ganancia o pérdida de prestaciones de los macro-usuarios de la celda en los escenarios considerados.

II. LTE MOVING RELAY NODE

Los escenarios ferroviarios de alta velocidad representan un gran reto a la hora de satisfacer los niveles requeridos de QoS en las comunicaciones. Los escenarios ferroviarios cuentan con altas pérdidas de penetración por el blindaje de los vehículos, variaciones temporales rápidas en el canal radio, e interferencia entre portadoras (*Inter-Carrier Interference*, ICI) debida al efecto del desplazamiento Doppler. Además, en los despliegues típicos de redes LTE, los usuarios de a bordo del tren competirían en situación de desventaja con los usuarios peatonales de la macro-celda, dado que el eNodo-B (eNB) los trataría como a usuarios normales. Sin embargo, es evidente que estos usuarios tendrán que hacer frente a peores condiciones de propagación del canal, similares a las de los usuarios situados en el borde de la celda [1].

Se han propuesto diversas soluciones para lograr mejorar de las prestaciones de LTE en los entornos vehiculares: la

arquitectura de transmisión *Coordinated Multi Point* (CoMP), el concepto de *Moving Extended Cell* (MEC) y la arquitectura MRN. Esta última es la que por el momento está ganando más impulso, y actualmente está siendo estudiada en la *Release 12* del estándar LTE [4].

La arquitectura MRN permitiría ahorros importantes en términos de tráfico de señalización, y un aumento en la eficiencia de los trasposos, por medio de la agregación de múltiples conexiones de usuarios en un único punto de acceso. Además, la antena del *relay*, situada en la parte superior del tren, llevará a un incremento en el rendimiento del receptor, evitando las pérdidas del blindaje y aumentando la calidad de la señal recibida [3]. El MRN está conectado a un *Donor eNB* (DeNB), y a este enlace se le denomina conexión de retorno o *backhaul* (DeNB-MRN). El enlace DeNB-MRN tendrá que lidiar con todos los retos específicos de los escenarios ferroviarios. Los usuarios de a bordo son atendidos por el MRN, y a este enlace se le conoce como enlace de acceso MRN a Usuario (MRN-Ue). Es evidente que ambos enlaces deberían operar ortogonalmente para evitar las interferencias.

Resulta importante evaluar dos aspectos clave del funcionamiento del *relay*. El primero de ellos es el modo de operación: *duplex* o *half-duplex*. El segundo está relacionado con las bandas en la cual operan los enlaces del *relay*, es decir, en modo *in-band* (en banda) o en modo *out-band* (fuera de banda). Un MRN *half-duplex* no puede transmitir y recibir simultáneamente. Sin embargo, un MRN *full-duplex* puede recibir y transmitir al mismo tiempo. Aunque los MRN *full-duplex* pueden lograr tasas de datos más elevadas, su implementación es más compleja y cara, ya que requieren de un buen aislamiento entre los módulos del transmisor de RF y el receptor.

Teniendo en cuenta la banda de operación, el funcionamiento del MRN puede ser *in-band* o *out-band*. Para los *in-band relays*, los enlaces DeNB-MRN y MRN-Ue operan en la misma banda de frecuencias, mientras que para el *out-band relay*, ambos enlaces operan en bandas diferentes. El modo de funcionamiento *out-band* permite transmisiones *full-duplex* sin requerir de grandes cambios en las especificaciones de la capa física, como se indica en [5]. Su principal desventaja es la necesidad de compartir el espectro disponible. Con el modo *in-band*, los enlaces de acceso y *backhaul* del *relay* nunca se encuentran activos al mismo tiempo. Para lograr la ortogonalidad, los enlaces son multiplexados en el tiempo en una estructura basada en subtramas.

La principal ventaja de esta configuración es el funcionamiento del MRN sobre una portadora única, sin necesidad de espectro adicional. Los principales inconvenientes de este modo de transmisión son: la transmisión de datos de control al MRN, y el retardo que sufren los usuarios de a bordo del tren. El MRN requiere de intervalos de tiempo para poder conmutar de transmisión a recepción [6]. Además, la temporización de la transmisión del *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH) impone una serie de restricciones. A consecuencia de ello, el 3GPP decidió definir un nuevo canal de control del canal de retorno para el *relay*, el R-PDCCH. Sin embargo, la información contenida en el R-PDCCH debe ser transmitida empleando recursos de datos de usuario, y por tanto, dará lugar a una disminución en la eficiencia de transmisión de datos del enlace del MRN.

Es importante remarcar el hecho de que, en las redes LTE que operan con nodos *in-band relay* de Tipo 1, la asignación de subtramas para *backhaul* se limita a las subtramas MBSFN (*Multicast Broadcast Single Frequency Network*). La relación entre las subtramas MBSFN y el acceso por subtramas MRN-Ue, al igual que la posición de estas subtramas dentro de la trama radio LTE, tiene un impacto clave en las prestaciones del MRN.

III. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

Las simulaciones semi-estáticas a nivel de sistema tienen como finalidad evaluar el rendimiento de los usuarios de la macro-celda y del MRN en términos de capacidad del sistema. El simulador desarrollado permite realizar simulaciones a nivel de sistema con el nivel de precisión necesario. Este simulador semi-estático a nivel de sistema implementa modelos semi-analíticos para gestión de la movilidad y QoS en redes LTE, y posibilita una caracterización precisa de las rápidas variaciones en las condiciones del canal radio que experimentan tanto los usuarios a bordo del tren como el MRN. En la Tabla I se han resumido los principales parámetros de la simulación.

A. Escenario de estudio.

El escenario de la red LTE se compone de dos celdas. La celda 1 está atendida por el eNB1, y la celda 2, por el eNB2. Las vías del tren se encuentran a una distancia de 2 Km respecto al eNB1. Un tren desplazándose a una velocidad de 120 km/h arranca en la celda de la izquierda y viaja 1 km en línea recta, como se muestra en la Fig. 1. El tren se compone de un solo vagón con 10 usuarios (Ue) a bordo. Dependiendo de si hay o no un MRN, los 10 UEs se conectarán directamente al eNB1 o serán agregados en el MRN. En cada celda, los macro-usuarios están distribuidos aleatoriamente con una velocidad de 3 km/h. Por tanto, las dos celdas pueden contener un número diferente de usuarios. El número total de usuarios peatonales puede ser de 10, 30 o 50.

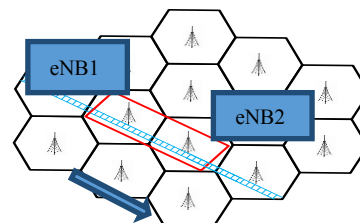


Fig. 1. Despliegue LTE en escenario ferroviario.

B. Modelado del canal

El modelo de propagación del canal para los usuarios de a bordo del tren y el MRN se ha realizado siguiendo el modelo *Rural Macro-cell* (RMa) descrito en [7]. La ecuación de las pérdidas de propagación se presenta en (1).

$$PL = PL_1(d_{BP}) + 40 * \log_{10}(d / d_{BP}) \quad (1)$$

El desvanecimiento se calcula por medio de una distribución log-normal con una desviación típica de 6. Para los macro-usuarios peatonales, se emplea un modelo de canal *Extended Pedestrian-A* (EPA). Los usuarios de a bordo sufren una penetración adicional modelada como un valor constante dependiente de la frecuencia.

C. Modelo Link to System

Aunque hubiera sido preferible seguir un enfoque basado en un único simulador, la complejidad de semejante simulador, que incluiría desde el procesado a nivel de enlace hasta el nivel de sistema de red, sería demasiado grande. En el simulador desarrollado, el modelo de relación entre los niveles de enlace y sistema se basa en una serie de tablas de consulta obtenidas de simulaciones realizadas a nivel de enlace, como en [8].

TABLA I. PRINCIPALES PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

Ancho de banda	5MHz
Frecuencia portadora	900 MHz
Tiempo de simulación	30000 ms
Reporte del CQI	Sub-bandas, 120 ms
Modelo de canal para los usuarios del tren y el MRN	RMa (ITU 3K/62-E)
Modelo de canal para usuarios de a pie	EPA (3 km/h)
Esquema de transmisión	SISO
Ganancia y altura de la antenna del MRN	4 dB, 3 m
MBSFN subtramas	3 o 4
Pérdidas de penetración en el tren	15 dB
PIRE y altura del DeNB	58 dB, 30 m
Número de usuarios a bordo del tren	10
Tipo de tráfico	Video-streaming 384 Kbps

D. Modelo de gestión de los recursos radio

Todas las funcionalidades de la gestión de recursos radio, como la adaptación del Enlace (*Link Adaptation*, LA), el planificador de paquetes (*Packet Scheduler*, PS) y la Solicitud de Repetición Automática Híbrida (*Hybrid Automatic Repeat Request*, HARQ) han sido rigurosamente modelados. El mecanismo implementado para el Indicador de Calidad del Canal (*Channel Quality Indicator*, CQI) está basado en una realimentación periódica por sub-bandas según el usuario seleccionado. El proceso de LA se modela mediante Modulación y Codificación Adaptativas (AMC), basadas en las condiciones de estado del canal. Para mantener el objetivo de *Block Error Rate* (BLER) en la primera transmisión, se han desarrollado también mecanismos de adaptación del enlace por lazo externo (*Outer Loop Link Adaptation*, OLLA). Además, en nuestro simulador se han modelado procesos de HARQ, que son tenidos en cuenta para calcular el rendimiento del receptor. El PDCCH se modela parcialmente, estimando el número de Elementos de Control de Canal (CCEs) requeridos por los diferentes usuarios dependiendo del estado de su canal de propagación y del ancho de banda del sistema LTE. Una vez que se ha seleccionado el esquema de modulación y codificación, y el planificador ha asignado una serie de bloques de recursos (Resource Blocks, RBs) al usuario, el tamaño del bloque de transporte (Transport Block Size, TBS) se calcula de acuerdo con la ecuación (2).

$$TBS = f(MCS, \text{NumberPRBs}) \quad (2)$$

El TBS depende de varios factores, como el número de recursos asignados al PDCCH, el número de capas, el modo de reporte del CQI del usuario y el número de RBs asignados. Una vez que el TBS ha sido calculado, será dividido en Bloques de Código (CBs) si es necesario.

E. Planificación de recursos

El planificador, o *scheduler*, ha sido modelado como un planificador desacoplado en el dominio del tiempo (TD) y de la frecuencia (FD), para sacar provecho del estado del canal de cada usuario. El planificador sigue un enfoque de asignación oportunista del conjunto de RBs disponibles en una malla tiempo-frecuencia. Para empezar, los usuarios con HARQ son introducidos en el proceso de compartición de recursos, después, se asignan los PRBs a los usuarios de acuerdo con su calidad del canal y la tasa de datos requerida. Por tanto, los usuarios son distribuidos por orden de prioridad, según el plazo límite de vencimiento de sus paquetes. El planificador FD asigna los RBs de mejor calidad a los usuarios en función de sus prioridades [8].

F. Generación de tráfico

Aunque el simulador implementado permite trabajar con distintos tipos de tráfico en tiempo real, como por ejemplo VoIP, navegación web, etc., en este estudio todos los usuarios demandarán un servicio de *video streaming* de 384 Kbps. El tráfico se genera de acuerdo con los parámetros representados en la Tabla II.

TABLA II. PARÁMETROS GENERACIÓN TRÁFICO

Tipos de información	Distribución	Parámetros
Tiempo entre llegadas de las tramas	Determinístico	100 ms
Número de paquetes por trama	Determinístico	8
Tamaño del paquete	Pareto Truncada (Media = 600 bytes Min = 415 bytes Max = 935 bytes)	$\alpha = 1.2$
Tiempo entre llegadas de los paquetes de una trama	Pareto Truncada (Media = 8.34 ms Min = 6 ms Max = 12.5 ms)	$\alpha = 1.2$

G. Configuración del Mobile Relay

El MRN es un *relay* de Tipo 1. Se ha estimado una reducción global del 7% en la capacidad del enlace de *backhaul* debida al modo de funcionamiento *in-band*. Aunque el número de subtramas MBSFN puede ser de hasta 6, para los propósitos de nuestra simulación, se ha considerado un número fijo de 4 subtramas MBSFN cada 10 milisegundos para los escenarios del MRN. Su posición dentro de cada trama está ligada a la primera, segunda, sexta y séptima subtramas, para el escenario de 4 MBSFNs.

IV. RESULTADOS

A. Prestaciones para los pasajeros del tren con y sin MRN.

El rendimiento del MRN se evalúa para el escenario descrito en la sección anterior. Los resultados serán comparados con la situación en la que no existe la arquitectura de acceso MRN, y por consiguiente, los usuarios a bordo del tren deberán conectarse directamente al servidor eNB1 de la macro-celda.

Estos resultados pueden verse en la Fig. 2, y muestran que el rendimiento del MRN mejora considerablemente los resultados obtenidos por los pasajeros. Con 10 usuarios en la macro-celda, el MRN puede satisfacer casi por completo toda la capacidad requerida (aproximadamente 3840 Kbps), mientras que para 50 usuarios en la macro-celda, el 90 % de las veces se alcanzan los 3 Mbps. Sin embargo, sin MRN, los usuarios a bordo del tren sólo consiguen hasta 1.6 Mbps para el escenario con 10 usuarios en la macro-celda.

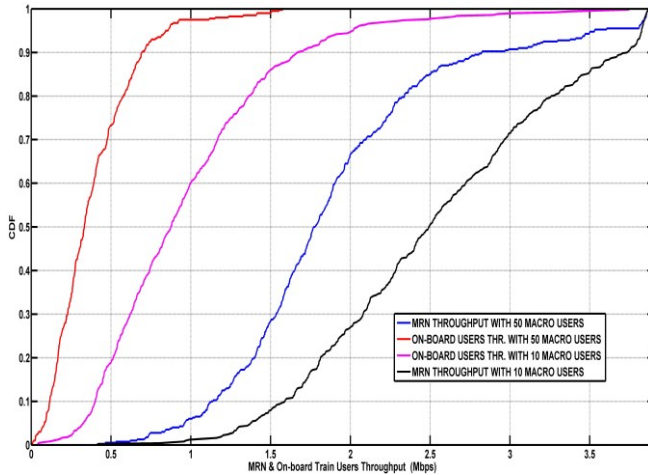


Fig. 2. Rendimiento del MRN (rojo, negro) & pasajeros a bordo (azul, rosa) con diferente número de usuarios (carga) en las macro-celdas.

Es evidente que el MRN puede mejorar la capacidad de los pasajeros del tren en más de un 50% en comparación con el escenario en que no había MRN.

B. Impacto de la carga de la red en las prestaciones del MRN

En esta simulación, se ha evaluado el impacto del número de usuarios de la macro-celda en las prestaciones del MRN. La tasa de datos obtenida para el MRN, mientras se incrementa el número de macro-usuarios desde 1 hasta 50, se muestra en la Fig. 3.

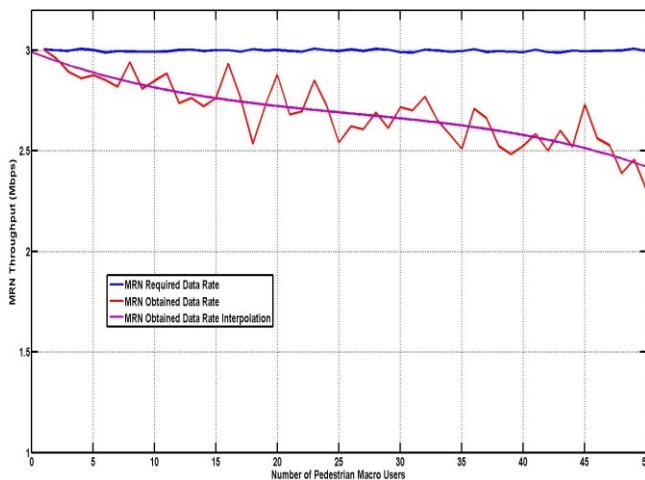


Fig. 3. Resultados del MRN (Mbps) para 4 subtramas MBSFN asignadas cuando el número de macro-usuarios peatonales crece de 1 a 50.

Puede observarse que la interferencia co-canal tiene un gran impacto en el rendimiento del MRN. A medida que el número de macro-usuarios crece en la celda del eNB2, hay

más colisiones entre los recursos asignados a los usuarios del eNB2, y las portadoras asignadas para la transmisión de las subtramas de *backhaul* del MRN. Es evidente que se deberán desarrollar mecanismos para evitar las interferencias si se quiere mejorar el rendimiento del MRN y de la red celular.

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha analizado el impacto de diferentes arquitecturas de acceso LTE para escenarios ferroviarios de alta velocidad. Los beneficios e inconvenientes del despliegue de la arquitectura de acceso MRN en dichos escenarios han sido evaluados y cuantificados. Además, se ha estudiado el impacto de la inclusión del MRN en el rendimiento global de la red, en términos de capacidad de la misma. Los resultados muestran que las prestaciones del MRN dependen en gran medida de la distancia entre las vías del tren y el servidor eNB, y del número de subtramas MBSFN asignadas. Asimismo, la interferencia co-canal tiene un impacto considerable en las prestaciones del MRN. En cualquier caso, el MRN mejora los resultados obtenidos cuando no se implementa ningún MRN y los usuarios de a bordo del tren se conectan directamente al eNB. Más aún incluso, la introducción del MRN puede mejorar el rendimiento global de la red celular en los entornos ferroviarios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está patrocinado por el Ministerio de Economía y Competitividad, dentro de los proyectos IPT-2011-1272-430000, IPT-2011-1034-37000, TEC2011-28683.

REFERENCIAS

- [1] J.Calle-Sanchez, M. Molina-García, J. I. Alonso, and A. Fernández-Durán, "Long Term Evolution in High Speed Railway Environments: Feasibility and Challenges". Bell Labs Technical Journal, vol. 18 No.2, Sept 2013, pp. 237-253.
- [2] Y. Yang, H. Honglin, X. Jing, and M. Guoqiang, "Relay Technologies for WiMax and LTE-Advanced mobile Systems", IEEE Communications Magazine, vol.47, no. 10, pp.100-105, October 2009.
- [3] W. Li et al., "Performance Evaluation and Analysis on Group Mobility of Mobile Relay for LTE-Advanced System," Veh. Tech. Conference (VTC Fall), 2012 IEEE, vol., no., pp.1-5, 3-6 Sept. 2012
- [4] "3GPP TR Technical specification group radio access network mobile relay for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)," 3GPP, Tech. Rep. TR. 36.836 v2.0.2, 2013.
- [5] Y. Yuan, "LTE-A relay study and related technologies" in LTE-Advanced Relay Technology and Standardization, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013, ch. 3, pp. 54-57
- [6] J. Gora and S. Redana, "In-band and out-band relaying configurations for dual-carrier LTE-advanced system," IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011, vol., no., pp.1820,1824, 11-14 Sept. 2011
- [7] China (People's Republic of), "Supporting information towards propagation prediction method for high-speed train wireless communication systems," UIT Tech. Doc. UIT-R WP3K-AR, Aug. 2013.
- [8] J.Olmos, A.Serra, S.Ruiz, Imran Latif, "On the Use of Mutual Information at Bit Level for Accurate Link Abstraction inLTE with Incremental Redundancy H-ARQ", COST IC1004 TD(12)05046, Bristol, UK, 24-26 September, 2012