

Evaluación del rendimiento en el enlace ascendente de nodos repetidores móviles LTE en alta velocidad ferroviaria

Darwin Moreno-Paredes¹, Eduardo Martínez-de-Rioja², Jaime Calle-Sánchez², José I. Alonso²

Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones
ETSIT, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Madrid, España

¹darwin.morenop@alumnos.upm.es

²{eduardo.mdlnido, jcalle, ignacio}@gmr.ssr.upm.es

Abstract- Railway scenarios present several specific features that difficult the deployment of a radio communication network, especially for high speed trains. Nowadays, railway operators are evaluating the migration process from GSM-R to a new broadband system, like LTE. In this paper, system-level simulations are carried out in order to evaluate overall network performance with Mobile Relay Node architecture for LTE uplink access in High Speed Railway scenarios. This implies developing specific tools for accurate characterization of such propagation environments.

Palabras clave – Alta velocidad ferroviaria, LTE, MRN, enlace ascendente, rendimiento.

I. INTRODUCCIÓN

El actual sistema de comunicaciones ferroviarias, GSM-R es un sistema altamente fiable, pero sólo puede dar soporte a aplicaciones ferroviarias de banda estrecha, que no permiten dar servicios de alto valor añadido a los operadores y a los usuarios. Bajo este, y otros paradigmas, la industria ferroviaria tendrá que hacer frente al proceso de migración de GSM-R hacia nuevos sistemas de comunicación de banda ancha, como LTE. El despliegue de LTE en entornos ferroviarios de alta velocidad (HSR) representa un gran desafío, en el sentido de satisfacer los niveles de calidad de servicio (QoS) demandados por los usuarios abordo del tren [1]. Algunas características específicas de los escenario HSR son: Altas pérdidas de penetración debido a la carrocería, variaciones temporales rápidas (*fading*) en los canales de propagación y las interferencias interportadora (ICI) debidas al efecto Doppler del desplazamiento.

Una de las nuevas arquitecturas de acceso radio de la tecnología LTE, propuestas para escenarios móviles, son los nodos repetidores móviles (*Mobile Relay Node*, MRN). En trabajos anteriores, se ha llegado a la conclusión que instalando un MRN en la parte superior del vehículo, mejora el rendimiento global de la red [2]. Sin embargo, esos trabajos solo evalúan el enlace descendente LTE [2][3].

En este artículo, los autores evalúan el rendimiento del despliegue del acceso radio MRN para enlaces ascendentes de sistemas LTE en entornos ferroviarios de alta velocidad. Además, los autores abordarán el impacto de las diferentes configuraciones del MRN y la carga de las macro celdas en el rendimiento del enlace ascendente LTE.

II. NODOS REPETIDORES MÓVILES EN ENTORNOS FERROVIARIOS

En los últimos años, se han propuesto varias soluciones de arquitecturas de acceso radio para mejorar el rendimiento de los sistemas LTE en entornos móviles, pero los MRN juegan un papel importante respecto a otras alternativas del 3GPP. Los MRN se conectan a un eNode-B (eNB) mediante una antena externa. Este enlace (*backhaul*) tendrá que dar respuesta a las complejidades de conectividad que presentan los entornos HSR. Por otra parte, los usuarios abordo serán servidos por una antena interior (conexión de acceso).

El 3GPP ha definido dos categorías para los despliegues de repetidores en redes LTE. Los repetidores Tipo 1 integran un control de recursos completo y funcionalidades de traspaso dentro de su área de cobertura. Los repetidores de Tipo 2, transparentes para los usuarios del tren, se conectan directamente con el eNB, y contribuyen a la mejora de la QoS al utilizar diversidad de multitrayecto y ganancias en transmisión.

Los dos aspectos clave del modo de operación de los repetidores son: el método de comunicación (dúplex o semi-dúplex) y la relación entre el enlace de *backhaul* y los enlaces de acceso en relación a las bandas de operación en frecuencia: Dentro de banda; Fuera de banda.

Para repetidores dentro de banda, ambos enlaces trabajan en la misma banda de frecuencia, por lo que son multiplexados en el dominio del tiempo dentro de subtramas base [2]. Para repetidores fuera de banda, los dos enlaces trabajan en bandas diferentes.

La implementación estudiada se caracteriza por ser la más simple y más barata (Figura 1) siendo necesario únicamente un MRN Tipo 1 semi-dúplex dentro de banda. Las antenas interiores podrían ser reemplazadas por cable coaxial radiante.

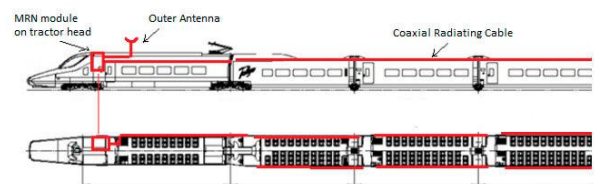


Fig. 1. Modelo de implementación para entornos ferroviarios

Al contrario que para el enlace descendente, donde se introdujo un nuevo canal de control para el enlace de *backhaul* (R-PDCCH), para el enlace ascendente no es necesario el uso de un nuevo canal de control para gestionar el *timing* de las transmisiones en el PUCCH. El inconveniente es que las señales de referencia (*Sounding Reference Signals*, SRS) tienen que ser configuradas en las subtramas de acceso anteriores a cada subtrama *backhaul* del MRN para poder usar el último símbolo de dicha subtrama para el *switching* del relay MRN. El número de subtramas *backhaul* asignadas a MRN Tipo 1 está fijada en función de las subtramas Multimedia Broadcast over a Single Frequency Network (MBSFN), que se definen y configuran para el enlace descendente. Por tanto, de forma implícita, se fija el ratio entre subtramas del relay MRN y subtramas sin relay para el enlace ascendente [2]. En el simulador desarrollado, se ha tenido en cuenta esta configuración de subtramas MBSFN en el enlace descendente, para definir en número de subtramas asignadas al relay para el enlace ascendente.

III. CONFIGURACIÓN DEL SIMULADOR DE RED FERROVIARIA

Se ha desarrollado un simulador LTE a nivel de sistema para el enlace ascendente con arquitectura de acceso MRN, en entornos ferroviarios. El simulador consta con modelos semi-analíticos para movilidad y control de QoS en redes celulares LTE, haciendo posible una caracterización precisa de las condiciones del canal de propagación radio. Los parámetros principales de la simulación han sido resumidos en la Tabla 1.

A. Escenario y entorno ferroviario

El escenario de la red LTE está compuesto por dos celdas atendidas por diferentes eNodes-B (Figura 3). El tren se desplaza a una velocidad de 360 km/h y está compuesto por un único vagón con 8 usuarios a bordo (las conexiones de dichos usuarios serán concentradas en el MRN). El número de usuarios peatonales, a partir de ahora usuarios-macro, puede ser modificado como una variable de entrada, moviéndose a una velocidad de 3km/h.

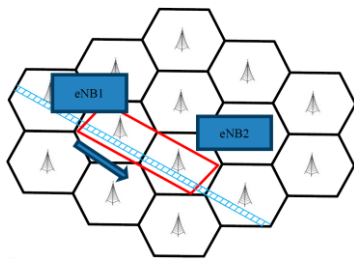


Fig. 2. Modelo de red LTE para entorno ferroviario

B. Modelo de canal

El enlace entre MRN y eNB se asumirá que tiene visión directa. El modelo de canal de propagación para los usuarios-macro está realizado de acuerdo con las especificaciones del modelo de canal Winner II en un escenario del tipo D1. Para los usuarios a bordo del tren y el MRN, se usará el modelo de canal específico para entornos HSR descrito en [4], el cual sigue la metodología propuesta por los modelos Winner II, aunque aún no ha sido estandarizado. Su principal diferencia respecto a otros modelos es que utiliza parámetros para escala en pequeñas variaciones de tiempo.

Ancho de banda	5 MHz
Frecuencia de la portadora	900 MHz
Tiempo de simulación	2000ms
Esquema de transmisión	SISO
Modelo de canal MRN	RMa (ITU 3K/62-E, 360 km/h)
Modelo de canal usuarios-macro	D1 (WINNER II, 3 km/h)
Perdidas de penetración del vehículo	25 dB
Periodo RS y ancho de banda	60ms, 1 MHz
Configuración HARQ	RTT = 8ms, 3 retransmisiones
BLER objetivo	10%
Número de usuarios abordo	8
Distancia de las vías al eNB	1 km
Tipo de tráfico para los usuarios abordo	40% VoIP, 20% video, 40% HTTP
Tipo de tráfico para los usuarios-macro	20% VoIP, 40% video, 40% HTTP

Tabla 1. Parámetros principales de la simulación

C. Modelo de tráfico

En nuestro simulador se pueden generar tres tipos de tráfico en tiempo real: VoIP, video streaming y navegación web (HTTP). Se ha establecido una tasa de transmisión (*Guaranteed Bit Rate*, GBR) para VoIP de 64kbps y 512kbps para video streaming. El tráfico de la navegación web (HTTP) es considerado como tráfico best-effort, por lo que no tiene tasa de transmisión establecida (GBR).

D. Modelo L2S (Link to System)

Se usará una abstracción del nivel de enlace, basado en la obtención de tablas SINR vs. BLER mediante simuladores LTE a nivel de enlace. Estas tablas serán consultadas durante la adaptación del enlace según el orden de asignación de CQIs (*Channel Quality Indicators*) a los usuarios, obtenidos a partir del valor de SINR considerando un umbral BLER del 10%. El modelo L2S también se usará para evaluar la llegada de paquetes al eNode-B.

E. Control de admisión

El algoritmo de control de admisión está basado en parámetros QoS (CQI – Identificador de clases de QoS – y GBR) que describen el tipo de servicio requerido por el UE. Representa una estimación de la capacidad disponible en la celda, en términos de número de bloques de recursos (*Resource Blocks*, RBs) disponibles, y se compara con los recursos de cada usuario entrante. El simulador desarrollado permite clasificar a los usuarios por prioridad, de vital importancia en sistemas de comunicación ferroviaria, donde las operaciones de comunicaciones críticas siempre deben recibir prioridad y recursos de la red.

F. Modelo de gestión de recursos radio

Todas las funcionalidades de gestión de recursos radio (RRM) han sido modeladas de manera rigurosa. La SINR por subportadora es estimada usando las SRS enviadas desde los UEs al eNode-B, donde tiene lugar el cálculo de CQIs. La adaptación del enlace o modulación adaptativa y codificación (*Adaptive Modulation and Coding*, AMC) se modela basándose en las condiciones del canal. Cada CQI está asociado con tasas de código y esquemas de modulación. El algoritmo OLLA (*Outer Loop Link Adaptation*) modifica los CQIs de los usuarios ajustándolos a los valores de SINR obtenidos con las medidas de SRS, con el fin de mantener el BLER objetivo en la primera transmisión. Ha sido considerado un HARQ síncrono no-adaptativo y teniendo en cuenta para evaluar el rendimiento del receptor.

G. Algoritmos de reparto de recursos

El simulador implementa funcionalidades de reparto de recursos para MRN y usuarios-macro de la celda. Ha de resaltarse que el reparto en el enlace ascendente tiene varias restricciones: limitación en la potencia de transmisión, asignación de RBs consecutivos (debido al uso de modulación SC-FDMA), información sobre el buffer de transmisión de los UE, etc.. Se atenderá primero a los usuarios HARQ con retransmisiones pendientes, y los RBs restantes serán asignados a los usuarios restantes. Para los objetivos de la simulación, se han elegido dos algoritmos: *Proportional Fair* y *Best SRS*.

H. Control de potencia

El simulador implementa mecanismos de control de potencia que pueden estar divididos en un ajuste en lazo abierto y un ajuste en lazo cerrado. La primera consta de la potencia base transmitida por RB, P_0 , el número de RBs asignados al usuario, N_{RB} , y el factor de compensación por pérdidas de propagación, $\alpha \leq 1$. El ajuste en lazo cerrado está formado por dos términos: el ajuste según el esquema de modulación y codificación utilizado, Δ_{MCS} , y el factor de ajuste del eNode-B, $f(\Delta_i)$.

$$P_{tx}[dBm] = \min\{P_{max}, P_0 + 10\log_{10}(N_{RB}) + \alpha \cdot L_{prop} + \Delta_{MCS} + f(\Delta_i)\}$$

I. Configuración MRN

La asignación de subtramas MBSFN para el enlace backhaul se hace mediante un algoritmo de reparto equitativo, basado en el número de usuarios abordo conectados al repetidor móvil respecto al total del número de usuarios en la celda. Hay 4 subtramas en cada trama LTE que no pueden estar configuradas como MBSFN para el enlace descendente (#0 #4 #5 y #9) debido a los procesos de búsqueda y sincronización. Este hecho implica que hay un máximo de 6 subtramas disponibles para la asignación de MBSFN (#1, #2, #3, #6, #7 y #8). Las subtramas no marcadas como MBSFN serán usadas para la transmisión del enlace de acceso MRN-UE. El número de subtramas MBSFN está definido de la siguiente manera:

$$N_{MBSFNsubframes} = \max\left\{6, 10 \cdot \left[\frac{N_{train-UEs}}{N_{macro-UEs} + N_{train-UEs}}\right]\right\} \quad (3)$$

Una representación de este mecanismo se puede ver en la Figura 3.

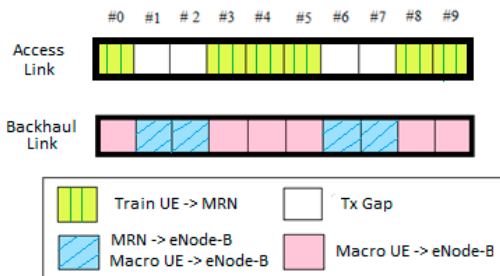


Fig. 3. Ejemplo de la transmisión sobre el backhaul and el enlace de acceso.

Después de una asignación semi-estática para el enlace de acceso descendente, la subtrama MBSFN para el enlace ascendente se puede obtener directamente aplicando un offset de 4 subtramas (tiempo de procesamiento del ACK/NACK). El procedimiento HARQ para el enlace backhaul fue diseñado con el objetivo de evitar colisiones entre el backhaul y los

enlaces de acceso. Por lo tanto, el simulador implementa HARQ síncrono no-adaptativo con RTT fija en un múltiplo de 8ms. Este modo de funcionamiento reduce la señalización de tráfico mediante canales de control, aunque presentan menor sensibilidad que los HARQ asíncronos adaptativos, son mayormente usados en el enlace descendente. Cuando empieza el proceso de asignación de tramas MBSFN, se decidió dar mayor prioridad a las retransmisiones HARQ del MRN y usuarios-macro, antes el MRN podía utilizar los RB libres para transmisiones propias. Esta política puede ser cambiada para priorizar el repetidor frente a los HARQ de los usuarios-macro, aunque no es una característica común en despliegues de redes LTE.

IV. RESULTADO Y DISCUSIONES

A. Rendimiento de la red con y sin MRN

Primero se estudia la mejora en el rendimiento de los usuarios abordo al añadir el módulo MRN en la parte superior del tren. Se selecciona el algoritmo de reparto *Best SRS*. Los resultados de las tasas de transmisión obtenidas se muestran en la Figura 4. Con 30 usuarios-macro en la celda, el MRN llega a 0.97 Mbps el 90% de las veces (frente a 1.3 Mbps de tasa de transmisión requerida), la cual es 15.5% mayor que si no se utiliza MRN (0.84 Mbps). Para 50 usuarios-macro la ganancia se encuentra alrededor del 60%.

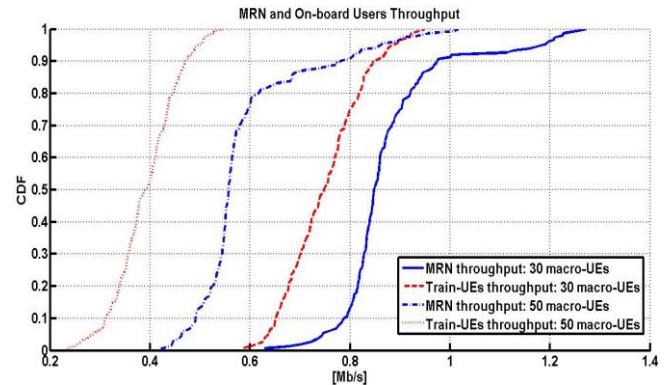


Fig. 4. Rendimiento de los usuarios del tren (Mbps) con y sin MRN.

Cuando no se instala MRN, los usuarios abordo competirán en desventaja con los usuarios-macro de la celda debido a las peores condiciones de propagación, siendo los últimos a los que se asigna recursos. Las tasas obtenidas por los usuarios-macro aumentan alrededor de 1 Mbps sin la presencia de MRN, como se puede observar en la Figura 5.

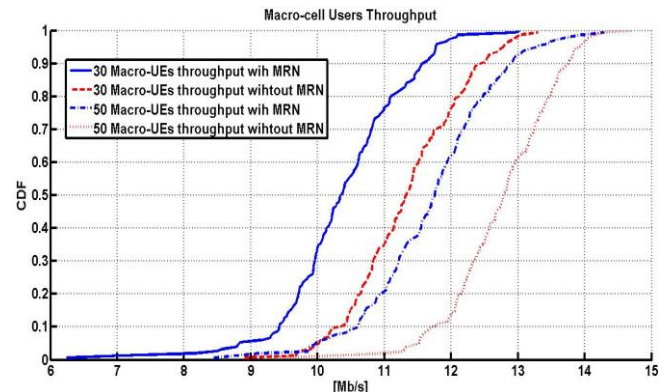


Fig. 5. Rendimiento de los usuarios-macro (Mbps) con y sin MRN.

B. Impacto del número de usuarios-macro en el rendimiento del MRN.

En esta simulación se estudia el impacto de los usuarios-macro de la celda en el rendimiento del MRN. Las tasas de transmisión obtenidas por el MRN con 10, 30 y 50 usuarios-macro se muestra en la Figura 6. Con 10 usuarios-macro en la celda, el MRN consigue 1.18 Mbps el 90% de las veces, lo que corresponde con el 89% de capacidad requerida (aproximadamente, 1.36 Mbps). Con 50 usuarios-macro dentro de la celda, el 90% de las veces se alcanza 0.75 Mbps que corresponde sólo con el 56% de la capacidad requerida.

Los resultados están fuertemente influenciados por el número de usuarios-macro, los cuales determinan el número de subtramas MBSFN para el enlace backhaul, de acuerdo con los algoritmos descritos en el apartado III. La capacidad obtenida por el MRN se reducirá según incremente el número de usuarios-macro. Además hay muchos conflictos entre los recursos asignados a los usuarios-macro y las subportadoras en la transmisión backhaul, observando que la interferencia co-canal tiene un fuerte impacto en el rendimiento del MRN. Se deberían desarrollar mecanismos de anulación de interferencias para mejorar el rendimiento total de la red.

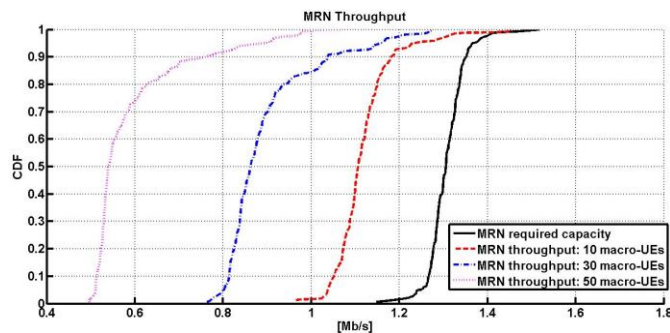


Fig. 6. Rendimiento del MRN (Mbps) con diferente número de usuarios-macro.

C. Impacto de los algoritmos de reparto en el rendimiento del MRN.

Se comparan los algoritmos *Best SRS* y *Proportional Fair* para encontrar aquel que maximice la tasa de transmisión. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7; el número de usuarios-macro en la celda se fija a 30. Como se puede observar, el rendimiento del MRN apenas está afectado por el algoritmo de reparto implementado en la celda.

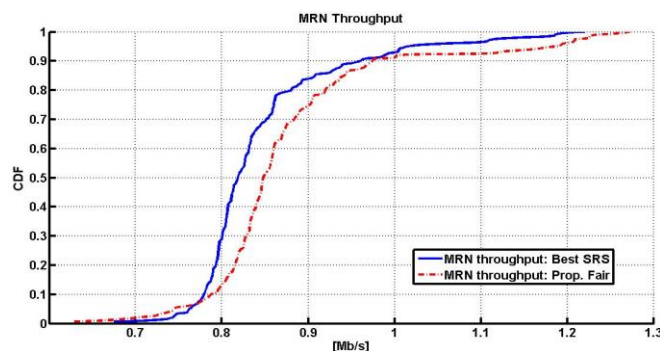


Fig. 7. Rendimiento del MRN (Mbps) con diferentes algoritmos de reparto.

D. Impacto de la configuración de subtramas MBSFN en el rendimiento del MRN.

Por último, se ha estudiado el impacto de la configuración de las subtramas MBSFN sobre el rendimiento del MRN. Se han valorado dos políticas de red diferentes, HARQ-prioritario y MRN-prioritario, para encontrar aquel que maximice la tasa de transmisión del MRN. Comparando la Figura 6. (HARQ-prioritario) con la Figura 8. (MRN-prioritario), se llega a la conclusión de que dando mayor prioridad a los usuarios HARQ se reduce ligeramente las tasas de transmisión del MRN, como era de esperar.

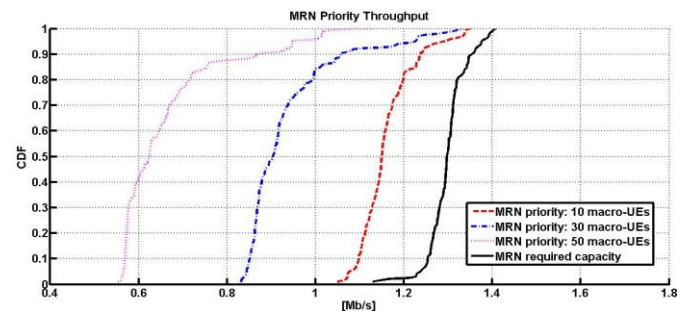


Fig. 8. MRN performance (Mbps) with MRN-priority in MBSFN.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo, los autores han analizado el impacto, en términos de capacidad de red, del despliegue de la arquitectura de acceso radio MRN en entornos ferroviarios de alta velocidad (HSR) para el enlace ascendente LTE. Los resultados muestran que el rendimiento del MRN depende enormemente de la configuración de las subtramas MBSFN y del número de usuarios-macro en la celda. Por lo tanto, el uso de MRN proporciona resultados claramente superiores respecto a no usar MRN, mejorando el rendimiento total de la red en entornos HSR.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación prestada por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos IPT-2011-1272-430000, IPT-2011-1034-37000, TEC2014-53815-R, para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] B. Ai, X. Cheng, T. Kürner, et al. "Challenges Towards Wireless Communications for High Speed Railway". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 15, No. 5, October 2014, pp. 2143-2158.
- [2] J. Calle-Sanchez, D. De-Antonio-Monte, M. Molina-Garcia, J. I. Alonso. "Theoretical Analysis and Performance Simulation of In-Band LTE Mobile Relays in Railway Environments". 28th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, pp 725-730, May 2014.
- [3] Y. Sui, A. Papadogiannis, T. Svensson. "The Potential of Moving Relay - A Performance Analysis". Vehicular Technology Conference VTC(Spring), 2012 IEEE 75th, pp. 1-5, May 2012.
- [4] 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.
- [5] J. Olmos, A. Serra, S. Ruiz, I. Latif, "On the Use of Mutual Information at Bit Level for Accurate Link Abstraction in LTE with Incremental Redundancy H-ARQ", COST IC1004 TD(12)05046, Bristol, UK, 24-26 Sept. 2012.