

# Evaluación Experimental de la Técnica Time-Reversal para Sistemas de Gran Ancho de Banda en Túneles

Concepción García Pardo<sup>(1)</sup>, Martine Liénard<sup>(2)</sup>, Pierre Degauque<sup>(2)</sup>,  
José María Molina García-Pardo<sup>(1)</sup> y Leandro Juan Llácer<sup>(1)</sup>

(1) Grupo Sistemas de Comunicaciones Móviles (SiCoMo)  
Dpto. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)  
Plaza del Hospital, 1. Antiguo Cuartel de Antigones. 30202 Cartagena (Murcia)  
Teléfono: 968 33 5399 Fax: 968 33 8867  
E-mail: [conchi.gpardo@upct.es](mailto:conchi.gpardo@upct.es)

(2) University of Lille 1, IEMN/TELICE  
Villeneuve d'Ascq, Cedex, France

**Resumen.** El objetivo de este artículo es investigar las ventajas que puede brindar la técnica Time-Reversal aplicada a sistemas UWB en un entorno especial como son los túneles. Este análisis se realizará experimentalmente mediante análisis de medidas en la banda de 2.8 a 5 GHz para distancias en el túnel desde 50 a 500 m. Primeramente se realiza un análisis de las propiedades de focalización espacial de Time-Reversal. Seguidamente se analizará, tanto para uno como para varios transmisores, el impacto de Time-Reversal en la reducción de la dispersión del retardo, hecho que está íntimamente relacionado con la diversidad espacial del canal.

## 1. Introducción

En los sistemas de transporte y más concretamente en túneles subterráneos hay una creciente necesidad de desarrollar sistemas más fiables y con mayores tasas de transferencias de datos.

Para lograr este objetivo una primera posibilidad es el uso de sistemas de múltiples antenas (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO). Dicha técnica ha sido reconocida como una forma efectiva de optimizar el uso del espectro y la potencia [1]. Sin embargo, el bajo orden de diversidad espacial en túneles (debido a su estructura guiada) puede limitar el uso de estos sistemas.

Otra posible forma de mejorar el enlace radio en túneles es el uso de sistemas Ultra-Wideband (UWB) que además permiten una precisa localización del móvil con gran precisión [2]. Sin embargo, estos sistemas presentan limitaciones en cuanto a potencia emitida para evitar la interferencia con otros sistemas.

Time-Reversal (TR), una técnica usualmente aplicada en acústica, ha sido recientemente extendida a ondas electromagnéticas. Uno de los principales objetivos de esta técnica es focalizar la energía hacia un usuario minimizando la interferencia con otros usuarios. Una de las principales ventajas de esta técnica también es el uso de receptores más sencillos así como un incremento del rango de las comunicaciones. La idea de combinar UWB y TR para beneficiarse de la propagación multicamino en interiores ha sido analizada [3], [4]. En túneles, en [5] se presenta un estudio teórico de TR con UWB para comunicaciones en túneles basado en un software de simulación de propagación en túneles rectangulares.

Sin embargo, existe una carencia de análisis experimental de la aplicación de TR en sistemas UWB en túneles. Por ello, en este artículo se presenta un análisis experimental de las prestaciones que brinda el uso de Time-Reversal en sistemas UWB en túneles. Primeramente se analizan las características más importantes de la señal recibida para varias posiciones del receptor a lo largo del túnel, tanto en caso de una única antena transmisora (SISO, Single-Input Single-Output) como en el caso de varias antenas transmisoras (MISO, Multiple-Input Single-Output). Seguidamente se analiza la mejora de TR en términos de reducción de la dispersión del retardo.

Este artículo se organiza como sigue: en la sección II se presentan el escenario, condiciones y el equipo de medidas; en la sección III analizan las prestaciones de TR desde el punto de vista de la focalización espacial como de la compresión temporal; finalmente en la sección IV se presentan las conclusiones extraídas de este trabajo.

## 2. Metodología de Medidas

La campaña de medidas se realizó en un túnel recto, cerrado al tráfico. La sección transversal es semicircular donde el diámetro de la parte cilíndrica es 8.6 m. La máxima altura es 6.1 m. en el centro del túnel.

El equipo de medidas está basado en un analizador de redes vectorial (VNA Agilent E5071B) y dos arrays virtuales. Las antenas utilizadas son dos antenas Electro-Metrics EM-6116 omnidireccionales. La antena receptora está directamente conectada al VNA mientras la transmisora está conectada a un transmisor/receptor óptico para poder incrementar la distancia entre transmisor y receptor.

Espacialmente, la distancia entre transmisor y receptor (distancia axial),  $d$ , varió entre 50 y 500 m. Para cada una de estas posiciones, en el plano transversal se tomaron 12 posiciones cada 3 cm ( $\lambda/2$  a frecuencia máxima) estando las antenas verticalmente polarizadas. En frecuencia se midieron 1601 puntos en frecuencias equiespaciados en la banda de 2.8 a 5 GHz (UWB).

### 3. Resultados

La implementación de TR implica un conocimiento a priori de la respuesta al impulso del canal (channel impulse response, CIR),  $h(d_0, \tau)$ . Una vez estimado, el CIR es invertido y conjugado,  $h^*(d_0, -\tau)$ , para ser usado como una precodificación de la señal transmitida. Por tanto, si la señal transmitida es el pulso  $p(t)$ , la señal recibida,  $y_{TR}(t)$  será:

$$y_{TR}(d, \tau) = (p(\tau) \otimes h^*(d_0, -\tau)) \otimes h(d, \tau) = \quad (1)$$

$$p(\tau) \otimes (h^*(d_0, -\tau) \otimes h(d, \tau)) = p(\tau) \otimes h_{eq}(d, \tau)$$

donde  $h_{eq}(d, \tau)$  es la respuesta al impulso del canal para una distancia  $d$  dada. Dado que en frecuencia, la operación convolución se convierte en producto y considerando que la respuesta al impulso del canal estimada está convolucionada con el pulso transmitido como resultado de una demanda previa del transmisor (1) se puede expresar como:

$$y_{TR}(d, \tau) = IFFT \left\{ \frac{P(f) \cdot P^*(f) \cdot H^*(d_0, f) H(d, f)}{\sqrt{|P^*(f) \cdot H^*(d_0, f)|^2}} \right\} \quad (2)$$

donde  $H(d, f)$  y  $P(f)$  son las respuestas en frecuencia de  $h(\tau)$  y  $p(\tau)$  respectivamente.

Para incrementar la ganancia usando TR, una posible solución ya propuesta es el uso de varias antenas en transmisión (MISO) [6]. En ese caso, para  $M$  transmisores, la señal recibida es la suma coherente de todas las señales TR recibidas en el receptor y puede expresarse como:

$$y_{TR}(d, \tau) = IFFT \left\{ \frac{\sum_{j=1}^M P(f) \cdot P^*(f) \cdot H_j^*(d_0, f) H_j(d, f)}{\sqrt{M |P^*(f) \cdot H_j^*(d_0, f)|^2}} \right\} \quad (3)$$

donde  $H_j(d, f)$  es la función de transferencia en frecuencia entre el transmisor  $j$  y el receptor.

En las siguientes secciones se analizará el comportamiento de TR en túneles tanto para configuraciones SISO como MISO con  $M=4$  antenas (separación entre antenas  $\Delta d=9$  cm.).

#### 3.1. Focalización Espacial

Como se mencionó anteriormente, una de las características de TR es la focalización de la energía hacia un receptor minimizando la interferencia con otros receptores. Para evaluar esta característica se ha considerado primero la precodificación óptima,

cuando el CIR  $h(d_0, \tau)$  ha sido estimado a la distancia del receptor objetivo ( $d=d_0$ ). La señal obtenida en este caso con SISO-TR se presenta en la Figura 1.a). Sin embargo, si el receptor se mueve a  $d=54$  m (Figura 1.b)) o a  $d=58$  m (Figura 1.c)) tras la estimación esta focalización de la energía no es tan evidente. Este efecto es debido a la baja correlación axial para distancias cortas en el túnel [7].

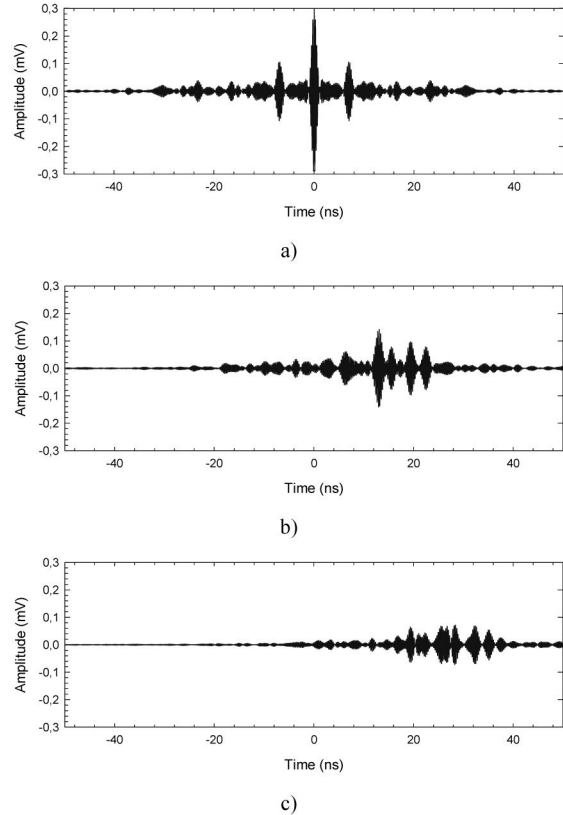


Fig. 1. Señal recibida usando TR, estimando el canal para  $d=50$  m, si la distancia transmisor receptor es de a) 50 m; b) 54 m y c) 58 m.

#### 3.2. Compresión Temporal

En la Figura 2 se comparan las señales recibidas usando TR para configuraciones SISO y MISO para la primera y últimas posiciones del receptor en el túnel.

Por un lado, se puede observar en ambos casos cómo la amplitud máxima de la señal se incrementa al usar múltiples antenas transmisoras (MISO), lo cual incrementará el alcance de las transmisiones. Por otro, comparando las figuras 1.a) y 1.b) se observa cómo para distancias pequeñas en el túnel el uso de una configuración MISO reduce la duración de la señal recibida. Sin embargo, este efecto no es tan claro para grandes distancias (figuras 1.c) y 1.d)). Este efecto se debe al hecho de que TR es más efectivo cuando existen muchas componentes multicamino que incrementan la riqueza espacial del canal. En túneles, esta situación se da particularmente para distancias transmisor-receptor pequeñas donde la correlación es menor [7]. Sin embargo, para grandes distancias el canal está altamente correlado, reduciéndose por tanto la riqueza espacial del canal.



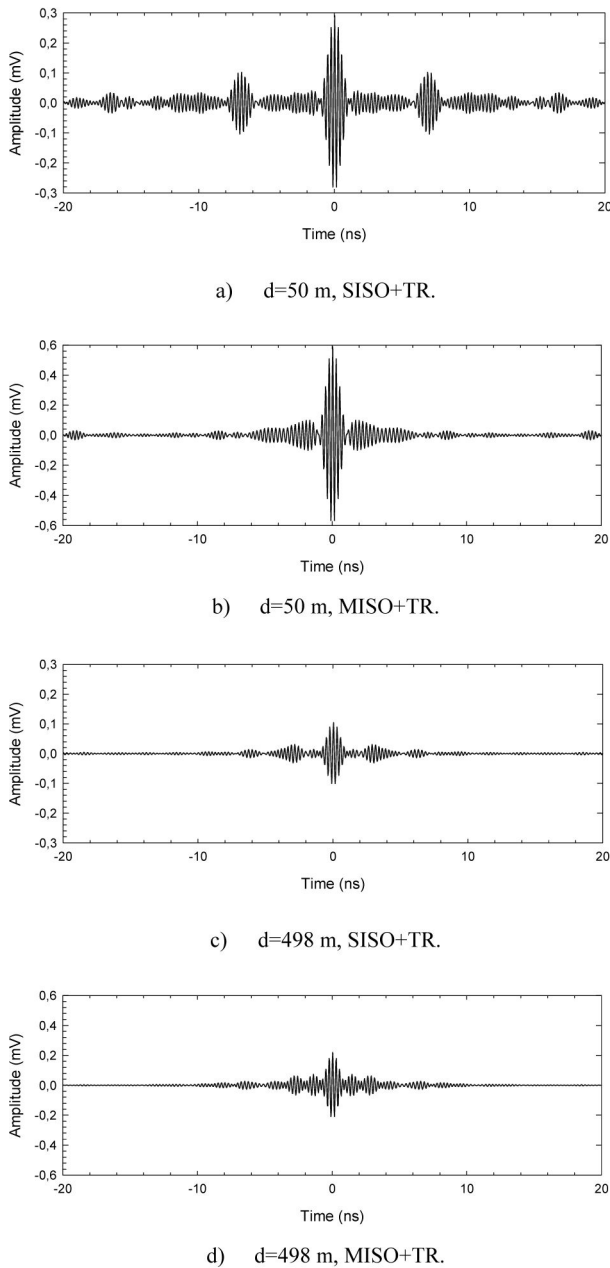


Fig. 2. Señal recibida para diferentes distancias en para configuraciones SISO y MISO con Time-Reversal (TR).

Esta situación se confirma mediante el análisis de la dispersión de retardo o RMS delay spread en función de la distancia transmisor-receptor a lo largo del túnel. En la Figura 3 se puede observar cómo TR por sí mismo no reduce la dispersión del retardo, mientras que TR combinado con MISO reduce dicho parámetro en los primeros 200 m.

#### 4. Conclusiones

En este artículo se ha evaluado la técnica Time-Reversal (TR) en túneles de forma experimental. Se ha confirmado cómo TR focaliza la energía hacia el receptor de forma exitosa mientras que minimiza la interferencia con otros receptores colindantes. Asimismo se ha observado que la combinación de TR con MISO contribuye a reducir la dispersión del retardo, especialmente al principio del túnel.

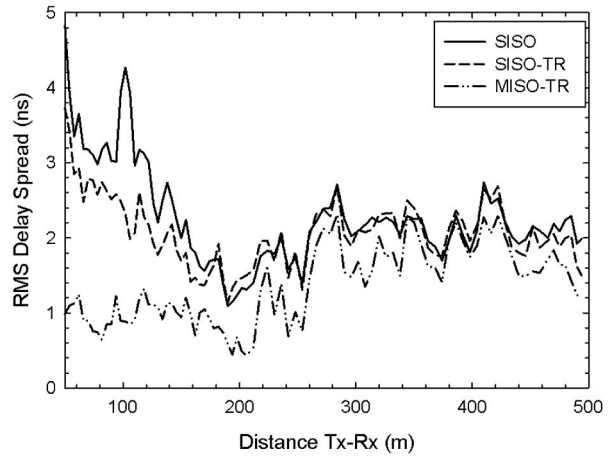


Fig. 3. RMS delay spread medio: SISO, SISO+TR, MISO+TR.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (TEC2010-20841-C04-03).

#### Referencias

- [1] Foschini, G. J., and M. J. Gans (1998), On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas, *Wireless Personal Communications*, 6(3), 311-335.
- [2] Molisch, A. F. (2009), Ultra-wide band propagation channels, *Proceedings of the IEEE*, 97, 353-371.
- [3] Naqvi, I. H., A. Khaleghi and G. El Zein (2010), Time reversal UWB communication system: a novel modulation scheme with experimental validation, *EURASIP J. on Wireless Com. and Networking*.
- [4] Pajusco, P. and P. Pagani (2009), On the use of uniform circular arrays for characterizing UWB time reversal, *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 57(1), 102-109.
- [5] Saghri, H., M. Heddebaut, F. Elbahhar, A. Rivenq and J. M. Rouvaen (2009a), Time-reversal UWB wireless communication-based train control in tunnel, *J. of Communications*, 4(4), 248-256.
- [6] Qiu, R. C., Chenming Zhou, Nan Guo, and J. Q. Zhang (2006), Time reversal with MISO for ultrawideband communications: Experimental results, *IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters*, 5(1), 269-273.
- [7] Molina-Garcia-Pardo, J. M., M. Lienard, and P. Degauque (2009), Propagation in tunnels: Experimental investigations and channel modeling in a wide frequency band for MIMO applications, *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, 2009, 560571.