

Limits of speed and distance in the transmission of information for an optical link of low cost with noise-free recovery

Santiago Abelardo Montoya-Castro, Mauricio Herrera-Duran & John Fredy Barrera-Ramírez

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. santiago.montoya@udea.edu.co, mauricio.herrera@udea.edu.co, john.barrera@udea.edu.co

Received: July 28th, 2016. Received in revised form: February 13st, 2017. Accepted: May 24th, 2017.

Abstract

In this paper we present the results of the information transmission by a conventional fiber optic network of low cost. The information to be transmitted is stored in a quick response code (QR code) and the transmission effects over the QR for different values of the bit rate and fiber length are analyzed. The simulations were performed using the software for optical devices and links VPI photonics. The implemented optical network does not use expensive optical devices such as doped fibers to amplify, dispersion compensating fibers or correction errors algorithms. The received QR code contains different kind of distortions generated by the conventional fiber optic network. The transmitted results are analyzed using the bit error rate and signal noise ratio parameters. The results show that the original information can be recovered without any kind of distortion for considerable distances and transmission rates due to tolerance to noise that exhibit the QR codes.

Keywords: Optical fiber; Noise-free transmission; QR codes.

Límites de velocidad y distancia en la transmisión de información por un enlace óptico de bajo costo con recuperación libre de ruido

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de la transmisión de información por una red de fibra óptica convencional de bajo costo. La información a transmitir se almacena en un código de respuesta rápida (código QR) y se analizan los efectos que produce la transmisión sobre el código QR para diferentes valores de la tasa de bits y la longitud de la fibra. Las simulaciones se realizaron con el software para enlaces y dispositivos ópticos VPI photonics. La red óptica implementada no usa dispositivos ópticos costosos tales como fibras dopadas para amplificar, fibras compensadoras de dispersión o algoritmos de corrección de errores. El código QR recibido contiene diferentes tipos de distorsiones generadas por la red de fibra óptica convencional. Los datos transmitidos se analizan usando como parámetros la tasa de error binario y la relación señal a ruido. Los resultados muestran que la información original puede ser recuperada sin ningún tipo de distorsión para distancias y tasas de transmisión considerables, debido a tolerancia al ruido que exhiben los códigos QR.

Palabras clave: Fibra óptica; transmisión libre de ruido; códigos QR.

1. Introducción

La creciente demanda en el uso y cobertura de servicios de internet requiere de canales de comunicación que soporten altas tasas de bits y largas distancias de transmisión, además de altos niveles de seguridad y confiabilidad sobre la información. Los sistemas de comunicación por fibra óptica se muestran como alternativa eficiente en la transmisión de

información, ya que éste medio ocasiona una atenuación mínima sobre las ondas de luz e inmunidad a interferencias electromagnéticas, permitiendo el envío de gran cantidad de información a largas distancias de transmisión [1,2]. La transmisión de información a través de sistemas ópticos se realiza modulando la intensidad de la luz proporcionada por una fuente óptica [2]. Esta modulación se puede lograr de forma directa o externa. En la modulación directa se enciende

How to cite: Montoya-Castro, S. A., Herrera-Duran, M., and Barrera-Ramírez, J. F., Límites de velocidad y distancia en la transmisión de información por un enlace óptico de bajo costo con recuperación libre de ruido, DYNA 84(201), pp. 234-240, 2017.



Figura 1. Distorsión de la información debido a la transmisión óptica.
Fuente: Los autores.

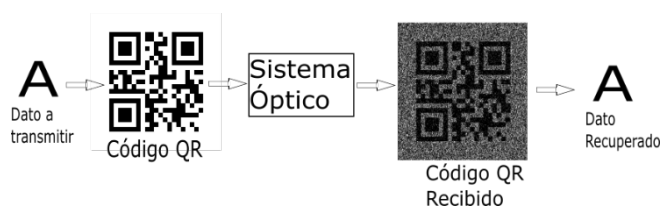


Figura 2. Recuperación libre de ruido.
Fuente: Los autores.

y apaga directamente el láser para representar los símbolos de la información, lo cual ocasiona un menor tiempo de vida del dispositivo [3]. Por su parte, en la modulación externa, dispositivos externos al láser modulan la luz antes de su paso a la fibra, por lo cual es de gran uso en los sistemas de comunicaciones ópticos actuales, ya que provee una señal de mejor calidad al evitar problemas derivados de la modulación directa [3,4]. Debido a las ventajas que representa la modulación externa y además de ser altamente usada en la actualidad, en este trabajo se implementa un sistema de comunicación óptico utilizando dicha modulación, simulando el funcionamiento de un modulador Mach-Zehnder, cuyo uso es apropiado para aplicaciones metropolitanas de largo alcance. Su funcionamiento se basa en el principio de interferencia, en donde el control se realiza mediante la modulación de la fase de la señal óptica [5,6].

En la etapa de recepción del sistema óptico, se recupera la información distorsionada, debido a los fenómenos lineales y no lineales generados por la fibra óptica y otros componentes ópticos sobre la luz, cuyos acoplamientos implican pérdidas adicionales en la transmisión [7]. En la Fig. 1 se muestran las diferencias entre el dato a transmitir y el dato recibido luego de su paso por el canal óptico de comunicación.

El dato se puede recuperar con pocas distorsiones cuando el sistema de transmisión posee fibras dopadas, fibras compensadoras de dispersión, y/o es complementado con algoritmos de corrección de errores; por mencionar algunas de las posibilidades. La inclusión de estos elementos hace que el costo del sistema de comunicación por fibra óptica se incremente considerablemente. Como en la actualidad existe una gran demanda de sistemas de transmisión eficientes y de bajo costo, en este trabajo se aprovecha la tolerancia al ruido que tiene la lectura de los códigos de respuesta rápida o códigos QR (por las siglas en inglés de Quick Response) para transmitir y recuperar información por medio de un sistema de transmisión convencional de bajo costo. Aunque los códigos QR fueron creados en 1994 por la compañía japonesa Denso Wave para registrar y localizar repuestos en el área de la fabricación de vehículos, hoy en día su uso se ha extendido a diferentes áreas debido a su rápida lectura y su tolerancia al ruido, a pérdidas y a desalineaciones [8]. Los códigos QR se emplean para almacenar las direcciones y las URLs en revistas y anuncios, para la administración de inventarios en una gran variedad de industrias y en los últimos años para el procesamiento óptico de información [9-24]. Recientemente su utilización se ha extendido con mucho éxito y aceptación a las áreas de encriptación [9-19], validación óptica [20-22] y la formación integral de imágenes [23,24], por mencionar solo tres áreas.

Por otro lado, actualmente es posible simular el comportamiento de los sistemas de comunicaciones por fibra

óptica a través de soluciones de software, dentro de las cuales VPI Photonics se presenta como una de las más reconocidas y usadas a nivel mundial [25]. A través de esta herramienta se simula el envío de información almacenada en códigos QR. Aunque los códigos recibidos presentan las distorsiones asociadas a la transmisión mediante el sistema óptico, la tolerancia al ruido que presenta la lectura de los códigos QR permite recuperar la información que ellos contienen libre de cualquier tipo de degradación (Fig. 2). Con las simulaciones se logran identificar los límites en tasa de bit y distancia de transmisión a los que la información contenida en el código QR puede ser recuperada libre de ruido.

2. Descripción del sistema de comunicaciones de fibra óptica

En la Fig. 3 se muestra el diseño del sistema óptico de comunicación implementado en el simulador. En la etapa de transmisión se hace uso de un láser de onda continua para simular la señal óptica portadora, además se implementa un generador eléctrico que proporciona la señal moduladora, el cual consta de un generador de secuencias que simula los niveles de voltaje de la señal eléctrica que representa la trama de unos y ceros del dato que se va a transmitir, un generador de pulso gaussiano y un filtro con el que se ajusta la forma del bit, con el fin de ajustar la forma de los bits a la que se tiene en un caso real de implementación de un sistema óptico de comunicaciones [26]. Al final de la etapa de transmisión la señal portadora es modulada por la señal eléctrica mediante el uso de un modulador Mach-Zehnder. El canal de fibra óptica se simula con los parámetros característicos a una Fibra óptica Corning SMF28e operando en la longitud de onda de 1550 nm. Los parámetros usados en las diferentes etapas del sistema de transmisión se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros utilizados para el sistema óptico.

Etapa	Parámetros	Valor	Unidades
Transmisión	Frecuencia	1550	nm
	Potencia de salida del láser	3	dBm
	Ancho de línea máximo en frecuencia	1	MHz
Canal	Atenuación máxima	0.2	dB/Km
	Dispersión máxima	18	ps/(nm.Km)
	Coefficiente de PMD	0.2	ps/√Km
	Índice de refracción de grupo efectivo	1.4682	
Recepción	Responsividad	0.85	A/W
	Diámetro activo	75	µm
	Corriente oscura	0.3	nA
	Ancho de banda	2	GHz

Fuente: Hoja de datos láser RDT-1550A [27], Hoja de datos Fibra óptica Corning SMF28e.ITU-T G652 [28], Hoja de datos diodo PD-5100 [29].

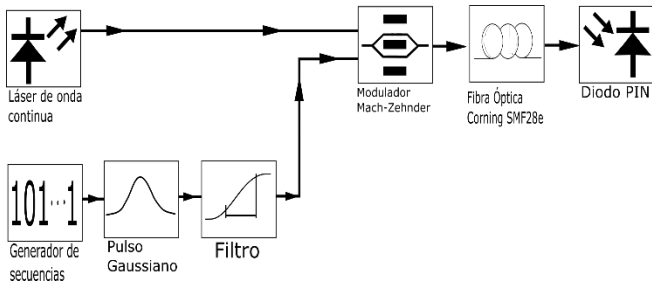


Figura 3. Sistema de comunicación a través de fibra óptica, diseñado con el software VPI photonics.
Fuente: Los autores.



Figura 4. Código QR correspondiente a la letra A.
Fuente: [31]

En la etapa de recepción se simula el comportamiento de un fotodiodo de referencia comercial PD-5100. Al final del proceso, un analizador de espectro posibilita recuperar la trama de bits y visualizar algunos parámetros asociados a la calidad de la señal recibida, como lo son la tasa de error de bits (*BER*, Bit Error Rate) y la relación señal a ruido (*SNR*, Signal Noise Ratio). Los parámetros asociados a cada uno de los elementos del sistema óptico de comunicaciones son valores típicos usados en redes que se encuentran actualmente implementadas [30].

3. Descripción del proceso

La información a ser enviada a través de la fibra óptica es un código QR que corresponde a la letra A, el cual se muestra en la Fig. 4. Dicho código ha sido previamente procesado con el fin de facilitar su conversión a niveles de voltaje con el generador de secuencias. Posteriormente, con esta trama se modula la señal portadora, que se encarga de transportar el código por la fibra óptica hasta el receptor, en el que se obtiene un código ruidoso y de intensidad atenuada que permitirá recuperar el mensaje original sin distorsión alguna.

En las simulaciones se tienen en cuenta los efectos de la atenuación, de las dispersiones y de los fenómenos no lineales asociados a la fibra óptica, además del ruido térmico y del ruido shot generados en el fotodetector [32]. Para los análisis se varía la tasa de transmisión en 1 Gbps, 2,5 Gbps, 5 Gbps, 7,5 Gbps y 10 Gbps, así como la longitud del tramo de fibra óptica entre los 0 Km y 200 Km. En las pruebas realizadas no se tiene en cuenta ningún método para compensar los efectos de atenuación, dispersión, fenómenos no lineales ni de las pérdidas generadas en el transmisor y en el receptor, lo que hace que el sistema sea de bajo costo. Para comprobar los resultados obtenidos de las simulaciones, se comparan la relación señal a ruido y la tasa de error de bit con respecto a las diferentes longitudes del tramo de fibra.

4. Tasa de error de bit *BER* (Bit Error Rate) y relación señal a ruido *SNR* (Signal to Noise Ratio)

La tasa de error de bit o *BER* proporciona una medida promedio de los errores ocurridos durante la transmisión. En sistemas de comunicación ópticos, el *BER* se emplea como un importante parámetro de diseño, ya que si el valor de *BER* es inferior a un valor límite, la señal no podrá ser recuperada. Debido a esto, éste parámetro limita la cobertura que puede ofrecer un sistema de comunicaciones. Un *BER* de 2×10^{-6} significa que hay dos errores por cada millón de bits de la trama. El *BER* está definido por la ec. (1).

$$BER = \frac{\text{número de bits errados}}{\text{número de bits transmitidos}} \quad (1)$$

Si se tiene una señal ruidosa a la entrada del receptor, éste podrá interpretar los “unos” como “ceros” y viceversa, dependiendo de qué tan ruidosa sea la señal y la robustez del algoritmo de decisión del que se haga uso [33]. La probabilidad de error está dada por la ec. (2).

$$P_e = aP(0/1) + bP(1/0) \quad (2)$$

Donde *a* y *b* son las probabilidades de recibir un 1 y un 0 respectivamente, con $a + b = 1$, $P(0/1)$ es la probabilidad de detectar un 0 cuando un 1 es recibido y $P(1/0)$ es la probabilidad de detectar un 1 cuando un 0 es recibido [34]. Además la ec. (2) se puede expresar en términos del umbral de decisión como se muestra en la ec. (3). Donde $f_{dp}(r/1)$ y $f_{dp}(r/0)$ son funciones de densidad de probabilidad condicionadas y *U* es el umbral de decisión.

$$P_e = a \int_{-\infty}^U f_{dp}(r/1) dr + b \int_U^{\infty} f_{dp}(r/0) dr \quad (3)$$

La relación señal/ruido o *SNR* por sus siglas en inglés (Signal to Noise Ratio) se define como la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que se genera durante su paso por los diferentes componentes del sistema. La *SNR* proporciona una comparación de la cantidad de señal con la cantidad de ruido de fondo de una señal en particular, de tal manera que una *SNR* mayor indica un ruido de fondo menos perceptible [35]. La *SNR* se puede expresar matemáticamente como se muestra en la ec. (4), donde *S* es la potencia media de la señal y *N* es la potencia media del ruido fondo, μ es la media de la señal o valor esperado y σ es la variación estándar del ruido.

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{\mu}{\sigma} \quad (4)$$

Eligiendo adecuadamente el umbral de decisión se puede demostrar que el *BER* está directamente relacionado con la *SNR* como se muestra en la ec. (5).

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}} \right] \quad (5)$$

Donde la *erfc* es la función de error complementaria que viene dada por la ec. (6) [36].

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (6)$$

5. Resultados

Para realizar la lectura del código QR que se ha recibido en la etapa final de la transmisión, se puede hacer uso de diferentes métodos, de los cuales tres de ellos son usados en este trabajo: 1) leer el código QR por medio de una aplicación móvil nativa con un Smartphone que no necesita conexión a Internet, 2) leer el código QR mediante el uso de una aplicación web y 3) hacer uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes (PDI) para binarizar el código QR recibido y luego leerlo. Cada uno de estos métodos permite realizar la lectura del código QR hasta una distancia máxima, según sea la tasa de bits y la distancia de transmisión, como

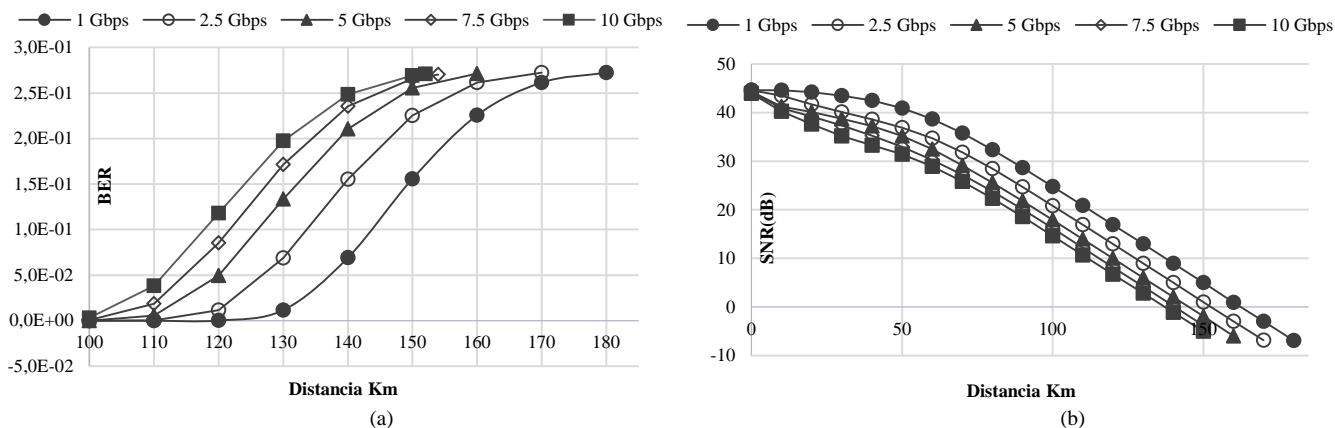


Figura 5. Curvas de lectura del código QR obtenido a la salida del receptor, con Smartphone. (a) Relación BER vs Distancia y (b) relación SNR vs Distancia. Fuente: Los autores.

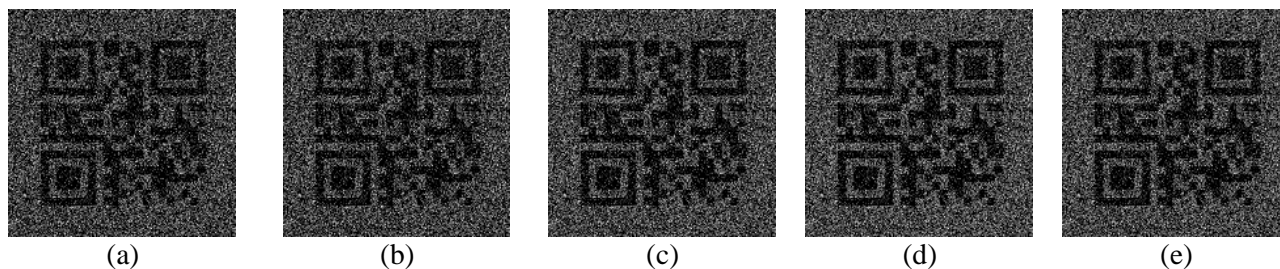


Figura 6. Códigos QR leídos con una aplicación nativa de Android (distancia crítica). (a) Tasa de transmisión 1 Gbps, distancia máxima 180 Km. (b) Tasa de transmisión 2,5 Gbps, distancia máxima 170 Km. (c) Tasa de transmisión 5 Gbps, distancia máxima 160 Km. (d) Tasa de transmisión 7,5 Gbps, distancia máxima 154 Km. (e) Tasa de transmisión 10 Gbps, distancia máxima 152 Km. Fuente: Los autores.

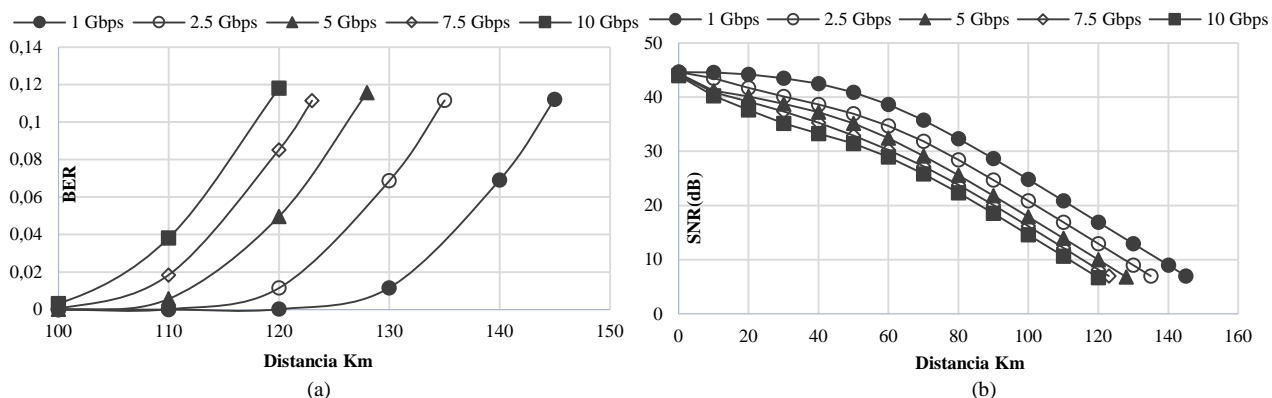


Figura 7. Curvas de lectura del código QR obtenido a la salida del receptor, vía web. (a) Relación BER vs Distancia y (b) Relación SNR vs Distancia. Fuente: Los autores.

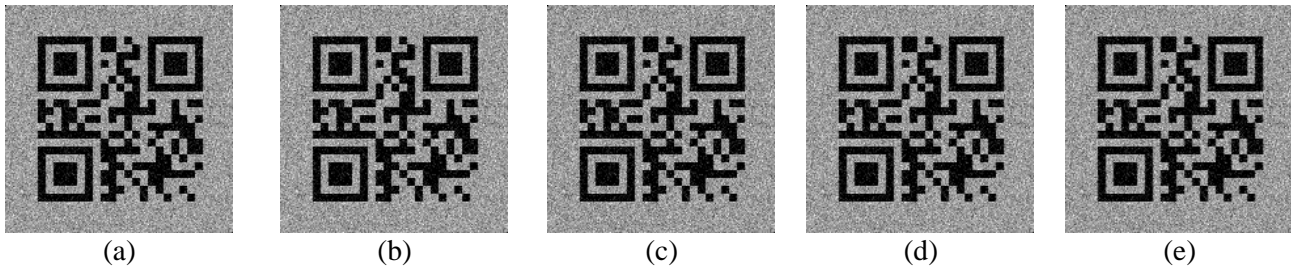


Figura 8. Códigos QR leídos vía Web (distancia crítica). (a) Tasa de transmisión 1 Gbps, distancia máxima 145 Km. (b) Tasa de transmisión 2,5 Gbps, distancia máxima 135 Km. (c) Tasa de transmisión 5 Gbps, distancia máxima 128 Km. (d) Tasa de transmisión 7,5 Gbps, distancia máxima 123 Km. (e) Tasa de transmisión 10 Gbps, distancia máxima 120 Km.
Fuente: Los autores.

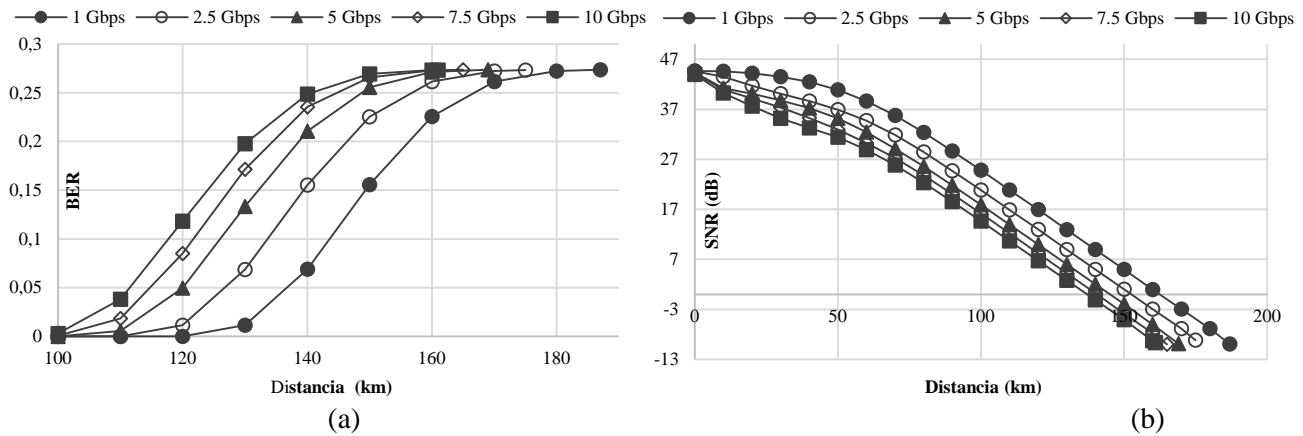


Figura 9. Curvas de lectura del código QR obtenido a la salida del receptor, aplicando PDI. (a) Relación *BER* vs Distancia y (b) Relación *SNR* vs Distancia.
Fuente: Los autores.

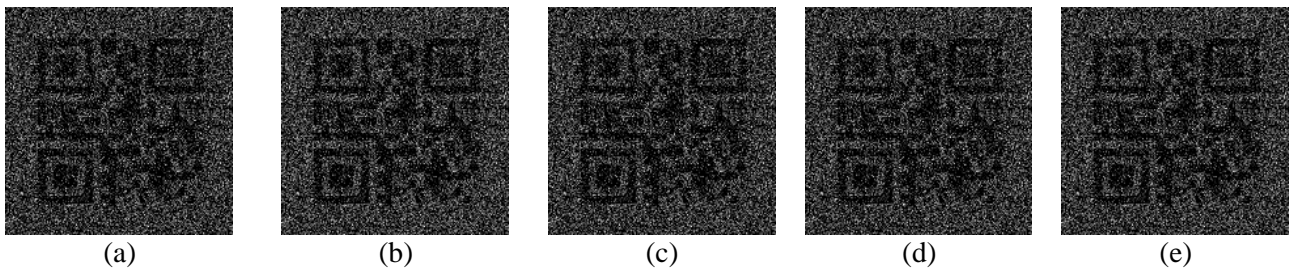


Figura 10. Códigos QR procesados digitalmente y luego leídos vía Smartphone (distancia crítica). (a) Tasa de transmisión 1 Gbps, distancia máxima 187 Km. (b) Tasa de transmisión 2,5 Gbps, distancia máxima 175 Km. (c) Tasa de transmisión 5 Gbps, distancia máxima 169 Km. (d) Tasa de transmisión 7,5 Gbps, distancia máxima 165 Km. (e) Tasa de transmisión 10 Gbps, distancia máxima 161 Km.
Fuente: Los autores.

se muestra en las Figs. 5, 7 y 9. En las Figs. 5a, 7a y 9a se presentan las curvas que relacionan el *BER* y la distancia de transmisión y en las Figs. 5b, 7b y 9b se muestran las curvas que relacionan la *SNR* y la distancia de transmisión, en donde cada una de las curvas representa el comportamiento a distintas tasas de bit y sus puntos máximos corresponden a la distancia máxima (crítica) a la que fue posible leer el código QR vía Smartphone, página web y con PDI respectivamente. En las Figs. 6, 8 y 10 se presentan los códigos QR correspondientes a cada distancia crítica, variando la tasa de bits y el método de lectura.

Los resultados muestran que a medida que aumenta la tasa de bits, la distancia máxima a la que se puede recuperar

el mensaje codificado en el código QR disminuye (Figs. 5, 7 y 9). Independientemente de la tasa de bits y la distancia de transmisión, cuando el *BER* alcanza un valor determinado el código QR no podrá ser recuperado. Tomando el mayor *BER* en cada uno de los métodos de lectura, se muestra que para la lectura del código con un Smartphone el *BER* máximo que puede tener el sistema es 0.272, con la lectura de la página Web el *BER* máximo es 0.118 y con PDI es 0.273 (Figs. 5a, 7a y 9a). Así mismo, en el caso de la relación señal a ruido también se tiene un valor mínimo con el cual se recupera la información contenida en el código QR. Para cada uno de los métodos de lectura usado, lectura con Smartphone, lectura con página web y PDI, el valor mínimo de la *SNR* es de -

6.889 dB, 6.705 dB y -10.016 dB, respectivamente (Figs. 5b, 7b y 9b). Independientemente del método de lectura usado para la recuperación del código QR, la diferencia entre las distancias alcanzadas con la tasa de bit menor y la mayor es aproximadamente constante. Si se comparan los resultados obtenidos para una tasa de bit de 1 Gbps y de 10 Gbps, cuando la lectura se realiza con un Smartphone, la diferencia entre distancias es 28 Km, en la lectura con página web es 25 Km y en la recuperación de código es 26 Km (Figs. 6, 8 y 10). Esto es importante destacarlo, ya que permite deducir que existe una dependencia de la tasa de bit y la distancia de transmisión con el método de lectura, pero al dejar éste último constante, no condiciona cuántos kilómetros más se pueden alcanzar al aumentar la tasa de transmisión. Es importante tener en cuenta que aunque en este trabajo se presenta como prueba de concepto la transmisión de la letra A, un código QR puede almacenar múltiples caracteres alfanuméricos dependiendo de la versión del código [8]. Recientemente se publicó un artículo donde se demuestra que es posible almacenar la información de una imagen en un código QR [37]. Por lo tanto, se abre la posibilidad no solo de transmitir imágenes sino también videos, ya que un video es una secuencia de imágenes proyectadas con cierta frecuencia. Adicionalmente, como un archivo de audio puede codificarse como una imagen, entonces también se puede transmitir audio con los códigos QR. Lo anterior implica que se abre una amplia gama de posibilidades en lo que respecta a la transmisión de diferentes tipos de información por medio de un sistema de comunicación a través de fibra óptica usando los códigos QR.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha simulado un sistema óptico de bajo costo que ha permitido identificar los límites en tasa de bits y distancia de transmisión a los cuales es posible recuperar información libre de ruido. El bajo costo en el sistema se logra ya que se hace uso de componentes básicos en un sistema de comunicaciones habitual, sin tener en cuenta dispositivos que de una u otra manera modifiquen el estado de la señal portadora, por ejemplo fibras dopadas para amplificar o fibras compensadoras de dispersión. Los resultados demuestran que puede transmitirse información por una red convencional de bajo costo y que la información se puede recuperar libre de cualquier ruido o distorsión. La máxima tasa de bits y la máxima distancia de transmisión se encuentran limitadas por fenómenos lineales y no lineales que aparecen durante el paso de la señal portadora por la fibra, además de la aparición de algunos ruidos en la etapa de recepción, lo que ocasiona que el código QR obtenido a la salida del receptor sea difícil de interpretar por alguno de los métodos tradicionales. Debido a la alta tolerancia que presentan los códigos QR ante el ruido, es posible recuperar la información de tal forma que ésta quede libre de ruido para considerables tasas de bit y distancias de transmisión. Cuando se usa PDI para recuperar la información se logra una mayor distancia de transmisión comparando con los otros dos métodos de lectura. La diferencia promedio independiente de la tasa de bits, entre lectura con PDI y lectura con aplicación móvil en un Smartphone es de 8,4 Km; y la diferencia entre

la lectura con PDI y la lectura con la aplicación web, independiente de la tasa de transmisión es de 41,2 Km. Se prevén futuras investigaciones que permitan evaluar el rendimiento de la transmisión, recepción y recuperación libre de ruido de grandes volúmenes de información codificada en códigos QR. Dicha información puede ser documentos almacenados como caracteres alfanuméricos o archivos de imagen, audio y video.

Agradecimientos

Esta investigación fue llevada a cabo con el apoyo del Comité para el Desarrollo de la Investigación -CODI- (Universidad de Antioquia-Colombia), COLCIENCIAS (Colombia), y la Estrategia de Sostenibilidad 2014-2015. John Fredy Barrera Ramírez agradece el apoyo del Centro Internacional de Física Teórica (The International Centre for Theoretical Physics - ICTP). Los autores agradecen el apoyo del grupo GITA (Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia) por su colaboración para el uso del software VPI Photonics que permitió obtener los resultados presentados en este artículo.

Referencias

- [1] Mahimkar, A., Chiu, A., Doverspike, R., Feuer, M.D., Magill, P., Mavroggiorgis, E., Pastor, J., Woodward, S.L. and Yates, J., Bandwidth on demand for inter-data center communication. HotNets-X Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, article 24, ACM New York, USA, 2011, DOI: 10.1145/2070562.2070586.
- [2] Agrawal, G.P., Fiber-Optic Communication Systems, 3a ed. Nueva York, Rochester, 2002, pp. 13-16.
- [3] Cox, C.H., Betts, G.E. and Johnson, L.M., An analytic and experimental comparison of direct and external modulation in analog fiber-optic links. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 38(5), pp. 501-509, 1990. DOI: 10.1109/22.54917.
- [4] Qi, G., Yao, J., Seregelyi, J., Paquet, S. and Bélisle, C., Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 53(10), pp. 3090-3097, 2005. DOI: 10.1109/TMTT.2005.855123.
- [5] Liao, L., Samara, D., Morse, M., Liu, A., Hodge, D., Rubin, D., Keil, U.D. and Franck, T., High speed silicon Mach-Zehnder modulator. Optics Express, 13(8), pp. 3129-3135, 2005, DOI: 10.1364/OPEX.13.003129.
- [6] Morozov, A.N. and Turchin, I.V., Method of optical coherence tomography with parallel depth-resolved signal reception and fibre-optic phase modulators. Quantum Electronics, 43(12), pp. 1165-1169, 2013. DOI: 10.1070/QE2013v043n12ABEH015222.
- [7] Ferreira, L.A., Santos J.L. and Farahi, F., Polarization insensitive fibre-optic white-light interferometry. Optics Communications, 114(5-6), pp. 386-392, 1995. DOI: 10.1016/0030-4018(94)00599-P.
- [8] ISO, IEC 18004: 2006, Information technology - Automatic identification and data capture techniques - QR Code 2005 bar code symbology specification. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
- [9] Barrera, J.F., Mira, A. and Torroba, R., Optical encryption and QR codes: Secure and noise-free information retrieval. Optics Express, 21(5), pp. 5373-5378, 2013, DOI: 10.1364/OE.21.005373.
- [10] Graydon, O., Cryptography: Quick response codes. Nature Photonics 7(5), pp. 343-349, 2013. DOI: 10.1038/nphoton.2013.127.
- [11] Barrera, J.F., Mira, A. and Torroba, R., Experimental QR code optical encryption: Noise-free data recovering. Optics Letters, 39(10), pp. 3074-3077, 2014, DOI: 10.1364/OL.39.003074.
- [12] Barrera, J.F., Vélez, A. and Torroba, R., Experimental scrambling and noise reduction applied to the optical encryption of QR codes. Optics

- Express, 22(17), pp. 20268-20277, 2014. DOI: 10.1364/OE.22.020268.
- [13] Trejos, S., Barrera, J.F. and Torroba, R., Optimized and secure technique for multiplexing QR code images of single characters: Application to noiseless messages retrieval. *Journal of Optics*, 17(8), 11 P., 2015, DOI: 10.1088/2040-8978/17/8/085702.
- [14] Barrera, J.F. and Torroba, R., Encriptación óptica de información con recuperación libre de ruido. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(1), pp. 48-54, 2015, DOI: 10.18257/raccefyn.259.
- [15] Qin, Y., Wang, H., Wang, Z., Gong, Q. and Wang, D., Encryption of QR code and grayscale image in interference-based scheme with high quality retrieval and silhouette problem removal. *Optics and Lasers in engineering*, 84(62), pp. 62-72, 2016: DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.03.028.
- [16] Vélez, A., Barrera, J.F. and Torroba, R., Customized data container for improved protection in optical cryptosystems. *Journal of Optics*, 18(12), 2016. DOI: 10.1088/2040-8978/18/12/125702.
- [17] Qin, Y. and Zhang, Y., Information encryption in ghost imaging with customized data container and XOR operation. *IEEE Photonics Journal*, 9(2), pp. 1-9, 2017, DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2690314.
- [18] Jiao, S., Zou, W. and Li, X., QR code based noise-free optical encryption and decryption of a gray scale image. *Optics Communications*, 387(1), pp. 235-240, 2017. DOI: 10.1016/j.optcom.2016.11.066.
- [19] Vélez, A., Barrera, J.F. and Torroba, R., Innovative speckle noise reduction procedure in optical encryption. *Journal of Optics*, 19(5), 055704, 2017. DOI: 10.1088/2040-8986/aa6526.
- [20] Carnicer, A., Hassanfiroozi, A., Latorre, P., Huang, Y. and Javidi, B., Security authentication using phase-encoded nanoparticle structures and polarized light. *Optics Letters*, 40(2), pp. 135-138, 2015. DOI: 10.1364/OL.40.000135.
- [21] Markman, A., Javidi, B. and Tehranipoor, M., Photon-Counting security tagging and verification using optically encoded QR codes. *IEEE Photonics Journal*, 6(1), pp. 1-10, 2014. DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2294625.
- [22] Li, W.S., Shen, Y., Chen, Z.J., Cui, Q., Li, S.S. and Chen, L.J., Demonstration of patterned polymer-stabilized cholesteric liquid crystal textures for anti-counterfeiting two-dimensional barcodes. *Applied Optics*, 56(3), pp. 601-606, 2017. DOI: 10.1364/AO.56.000601.
- [23] Markman, A., Wang, J. and Javidi, B., Three-dimensional integral imaging displays using a quick-response encoded elemental image array. *Optica*, 1(5), pp. 332-335, 2014. DOI: 10.1364/OPTICA.1.000332.
- [24] Xing, Y., Wang, Q.H., Xiong Z.L. and Deng, H., Encrypting three-dimensional information system based on integral imaging and multiple chaotic maps. *Optical Engineering*, 55(2), 023107, 2016. DOI: 10.1117/1.OE.55.2.023107.
- [25] Citations of VPI transmission Maker TM / VPI component Maker TM (lists more than 1000 publications in technical journals and conferences at 31 december 2013) [online]. Available at: <http://www.vpiphotonics.com/Services/Downloads/DownloadArea/Files/VPiphotonics-Citations.pdf>.
- [26] Wentzloff, D.D. and Chandrakasan, A.P., Gaussian pulse generators for subbanded ultra-wideband transmitters. *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(4), pp. 1647-1655, 2006. DOI: 10.1109/TMTT.2006.872053.
- [27] RAY Optoelectronic Equipment Co, Ltd., [online] CATV Series Technical Specification RDT-1550A.
- [28] ITU-T telecommunication standardization sector of ITU, series g: transmission systems and media, digital systems and networks Transmission media and optical systems characteristics – Optical fibre cables, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, Recommendation ITU-T G.652.
- [29] WDM pin photodiodes pd-5100 series, [online], electrical and optical characteristics pd-5100 series Photodiode 1.55 μm .
- [30] Bermúdez, H. and Jiménez, W., Wavelength Division Multiplexing – WDM a new alternative for optical communications. *Revista Investigación, Universidad del Quindío*, 18(1), pp. 49-58, 2008.
- [31] Generador QR-Code, 15 de Mayo de 2016, [online]. Available at: <http://www.qrcode.es/es/generador-qr-code/>.
- [32] Saxena, P.K. and Chakrabarti, P., Noise analysis of LWIR photodetector based on HgCdTe for free space optical receiver. *Advanced Optoelectronic Materials and Devices*, 2008. AOMD 2008. 2nd National Workshop on, 22-24 Dec. 2008, pp. 164-169.
- [33] Tsurcanu, D.N., Nistiriuk, A.P., Chihai, A.P., Nistiriuk, P.P., Baxan, L.V., Andronic, S.M., Nistiriuk, V., Rusuu, G.V., Alexei, A.S., Lazlovetkii, L. and Tsurcanu, T.P., Evaluation of bit error rate probability for radio communications and fiber-optic communication systems. *Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo)*, 2014, 24th International Crimean Conference, 2014, pp. 232-233.
- [34] Jeruchim, M., Techniques for estimating the bit error rate in the simulation of digital communication systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2(1), pp. 153-170, 1984. DOI: 10.1109/JSAC.1984.1146031
- [35] Keiser, G., *Optical Fiber Communication*, New Delhi, Tata McGrawHill, 4th Edition, 2010.
- [36] Fettes, H.E., Caslin, J.C. and Cramer, K.R., Complex zeros of the error function and of the complementary error function. *Mathematics of Computation*, 27(122), pp. 401-407, 1973.
- [37] Shuming, J., Wenbin, Z. and Xia, L., QR code based noise-free optical encryption and decryption of a gray scale image. *Optics Communications*, 387(1), pp. 235-240, 2017, DOI: 10.1016/j.optcom.2016.11.066.

S.A. Montoya-Castro, recibió el título de Ingeniero de Telecomunicaciones de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, en 2014. Durante su carrera se especializó en el área de redes y comunicaciones. Actualmente trabaja en el Grupo de Óptica y Fotónica de la Universidad de Antioquia, como auxiliar de investigación. En el año 2015 presentó la ponencia poster "Limits of speed and distance in the transmission of information for an optical link of low cost with noise-free recovery" en el marco del XIV Encuentro Nacional de Óptica & V Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus aplicaciones realizado en la Universidad del Valle del 16 al 20 de noviembre de 2015. Sus áreas de interés son procesamiento óptico de información, métodos ópticos para la encriptación y validación de información, fibra óptica, procesamiento digital de imágenes y procesamiento digital de señales.
ORCID: 0000-0002-5167-4924

M. Herrera-Duran, recibió el título de Ingeniero de Telecomunicaciones de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, en 2014. Realizó las prácticas académicas en el Metro de Medellín donde desarrolló el proyecto llamado Caracterización de cables de fibra óptica; Análisis de capacidad de una red de fibra óptica. A finales del año 2014 participó en el proyecto de jóvenes investigadores llamado "Oportunidades de implementación y desarrollo de un modelo técnico económico de tecnologías de generación distribuida en Colombia", el cual tuvo como participantes a COLCIENCIAS y el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico –CIDET. A partir de mayo del año 2015 participó en el proyecto de jóvenes investigadores llamado "Técnicas ópticas análogo-digitales de encriptación múltiple con potenciales aplicaciones para uso masivo", en el que participaron COLCIENCIAS y el Grupo de Investigación de Óptica y Fotónica de la Universidad de Antioquia. Actualmente se desempeña como desarrollador de software en la plataforma SAP, en la empresa Accenture.
ORCID: 0000-0003-2982-8867

J.F. Barrera-Ramírez, recibió los títulos de Físico, MSc. en Física y Dr. en Física de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, en 2001, 2003, y 2007, respectivamente. Su tesis Doctoral fue merecedora de la distinción "Suma Cum Lauden". Desde 2006 es profesor del Instituto de Física de la Universidad de Antioquia donde actualmente está en la categoría de profesor asociado y es coordinador del Grupo de Óptica y Fotónica. Recibió el premio internacional "2014 ICO/ICTP Gallieno Denardo Award", galardón otorgado por el Centro Internacional de Física Teórica ICTP (International Centre for Theoretical Physics, Trieste-Italia-2014). Adicionalmente, es miembro asociado de la Academia Mundial de las Ciencias TWAS (The World Academy of Sciences) en calidad de "Young TWAS Affiliate", hace parte de la lista de los "30 científicos latinoamericanos que están haciendo investigación científica promisoría" según se publicó en mayo de 2014 en el artículo "Latino América genial".
ORCID: 0000-0003-3260-0521.