

IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CONSTELACIONES NO UNIFORMES EN 1D EN MATLAB PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL ESTÁNDAR DTMB

Sandra Machado Zurita¹, Irina Siles Siles², Erik Ortiz Guerra³, Julio Cesar Pérez Garcia⁴

^{1, 2, 3, 4} Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5 ½,
¹e-mail: sandra.machado@nauta.cu, ²e-mail: irinass@uclv.edu.cu, ³e-mail: erik@uclv.edu.cu, ⁴e-mail: juliocpg@uclv.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio de las técnicas avanzadas de modulación, específicamente de las NUC (Non Uniform Constellations) y su comportamiento cuando son aplicadas a estándares de DTT (Digital Terrestrial Television). Esta aseveración está en función de seguir las tendencias actuales de la DTT que imponen un reto en cuanto a la optimización del espectro. Se utiliza un algoritmo de optimización para la obtención de las NUC, mediante el cálculo de sus correspondientes DoF (Degrees of Freedom) y capacidad de canal BICM (Bit Interleaved Coded Modulation). Se realizan simulaciones para diferentes modos de trabajo del estándar DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) para demostrar la mejora que le confieren las NUC sobre las UC (Uniform Constellations) convencionales definidas por la norma en cuestión. Los resultados que se obtienen son validados para capacidad de canal y BER (Bit Error Rate) y están en correspondencia a estudios similares en este ámbito.

PALABRAS CLAVES: NUC, DTMB, BICM, BER.

IMPLEMENTATION OF NON-UNIFORM CONSTELLATION TECHNIQUES IN 1D IN MATLAB FOR THE OPTIMIZATION OF THE DTMB STANDARD

ABSTRACT

In the present work, we present a study of advanced modulation techniques, specifically of the NUC (Non-Uniform Constellations) and their behavior when they are applied to DTT (Digital Terrestrial Television) standards. This statement is based on following the current DTT trends that impose a challenge in terms of spectrum optimization. An optimization algorithm is implemented to obtain the NUCs, by calculating their corresponding DoF (Degrees of Freedom) and BICM (Bit Interleaved Coded Modulation) channel capacity. Simulations are carried out for different working modes based on DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) standard to demonstrate the improvement that the NUC confer on the conventional UC (Uniform Constellations), this defined by the standard in question. The results obtained are validated for channel capacity and BER (Bit Error Rate) and are in correspondence to similar studies in this field.

KEY WORDS: NUC, DTMB, BICM, BER.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la Televisión Digital Terrestre (*Digital Television Terrestrial*, DTT) se ha caracterizado por la alta capacidad requerida para transmitir servicios de televisión de alta definición, además el espectro disponible se ha reducido drásticamente, lo que ha provocado desafíos a los que esta debe responder [1]. Con el devenir del tiempo la evolución de los estándares se ha materializado y se han vislumbrado tendencias que se concretan en la utilización eficiente del canal, enfocados a aspectos tales como la potencia, capacidad y cobertura [2]–[4]. Las constelaciones no uniformes (*del inglés non uniform constellation*, NUC) surgen como una de las técnicas

más innovadoras para tratar dichos requerimientos. Consecuentemente, en este trabajo se pretende realizar una investigación para ver la incidencia que tiene la inclusión de las NUC en una dimensión (1D) con el objetivo de optimizar el estándar DTMB, esto mediante su implementación en el *software Matlab*.

Para valorar la mejora significativa de las capacidades de transmisión, en [5] se aborda cómo las constelaciones QAM uniformes no cumplen lo requerido y se conduce a la idea de que las NUC podrían ofrecer una alternativa viable para la solución de dicha problemática. Siguiendo esta idea, se optimizan constelaciones que poseen tamaños hasta de 4096 QAM, logrando un aumento revelador en el cálculo de la capacidad BICM (*Bit Interleaved Coded Modulation*), reduciendo así, el déficit del límite teórico de Shannon.

1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS NUC

En la literatura consultada [6]–[9] existen dos tipos de constelaciones no uniformes. Las NUC-1D optimizan cada símbolo con respecto a un único eje de los dos posibles, lo que simplifica la complejidad de diseño de estas constelaciones. Se pueden de-mapear (obtener los bits recibidos a partir de los símbolos recibidos) con un simple de-mapeador de una dimensión. En contraste, en las NUC-2D cada símbolo se optimiza con respecto a ambos ejes, resultando constelaciones con una forma circular. La ventaja que presentan es el incremento de la capacidad del sistema con respecto a las constelaciones no uniformes de una dimensión y las uniformes. Sin embargo, presentan una serie de desventajas ya que la complejidad de diseño y el procesado en la etapa de recepción (es necesario un de-mapeador de dos dimensiones) es mayor que en el caso de las constelaciones no uniformes de una dimensión y las uniformes debido al mayor número de variables involucradas.

Los grados totales de libertad (*Degrees of Freedom, DoF*) en la optimización 1D-NUC son:

$$DoF = \frac{\sqrt{M}}{2} - 1. \quad (1)$$

Donde M representa el número de símbolos de la constelación en evaluación. La optimización de las constelaciones de orden superior requiere aumentar el número de variables, lo que también incrementa la carga de optimización. El número de parámetros de optimización para las constelaciones con cardinalidad de 16, 64, 256, 1024 y 4096 (Fig. 1) puntos requiere: 1, 3, 7, 15 y 31 variables de optimización, respectivamente. En general, la optimización comienza desde el mapeo de Gray y calcula los símbolos de constelación en un eje a partir de los parámetros indicados en la Tabla 1.

El objetivo es identificar los parámetros óptimos $\mathbf{a} = [a_0, a_1, \dots, a_N]$ que indican los valores positivos de los símbolos en un componente específico I o Q (parte real o imaginaria, respectivamente), donde N representa el DoF total. Debido a la restricción de la normalización de potencia, el valor más pequeño a_0 se establece en 1. Para un valor a alcanzar de SNR, la capacidad de BICM se calcula como una función de \mathbf{a} . A partir de este parámetro, es necesario generar la secuencia $\{-a_N, -a_{N-1}, \dots, -a_1, -1, 1, a_1, \dots, a_{N-1}, a_N\}$ que da las posiciones particulares de símbolos de constelaciones en cada componente. Es necesario tener en cuenta que con QPSK el DoF es $N = \frac{\sqrt{4}}{2} - 1 = 0$, y no hay una optimización posible con esta constelación. Las constelaciones con 16 puntos de cardinalidad son el caso más simple para evaluar.

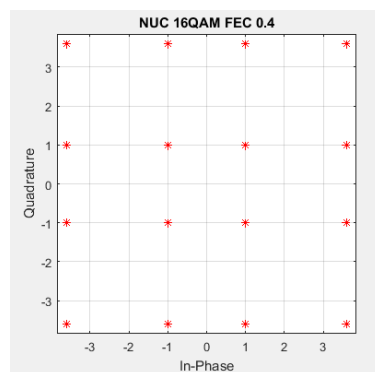


Figura 1: Representación de una constelación uniforme 16QAM.

Tabla 1. Parámetros de optimización de NUC 1D QAM.

| Constelación | DoF | Parámetros a optimizar |
|--------------|-----|-----------------------------------|
| 16 NUC | 1 | a_1 |
| 64 NUC | 3 | a_1, a_2, a_3 |
| 256 NUC | 7 | a_1, a_2, \dots, a_7 |
| 1024 NUC | 15 | $a_1, a_2, \dots, a_{14}, a_{15}$ |
| 4096 NUC | 31 | $a_1, a_2, \dots, a_{30}, a_{31}$ |

Capacidad del canal BICM

La capacidad de un canal con sistema BICM se puede calcular como la suma de las capacidades de cada bit de la constelación mapeada. La siguiente ecuación muestra la capacidad de cada bit asociado a un símbolo de la constelación [10], [11].

$$C_{b_i} = \iint \frac{p(y|b_i=0)\log_2 p(y|b_i=0) + p(y|b_i=1)\log_2 p(y|b_i=1)}{2} - p(y)\log_2 p(y) dy dx \quad (2)$$

Donde b_i es uno de los bits de los símbolos de la constelación mapeada y ry e iy son la parte real e imaginaria del símbolo recibido y , respectivamente. Además $p(y|b_i = 0)$ es la probabilidad condicional de recibir y dado que el bit transmitido fue un 0 y $p(y|b_i = 1)$ es la probabilidad condicional de recibir y dado que el bit transmitido fue un 1.

Por lo tanto la ecuación para calcular la capacidad del canal BICM total es:

$$C = \sum_{i=1}^n C_{b_i} \quad (3)$$

Donde $n = \log_2 M$, asumiendo que M es el número de símbolos asociados a la transmisión y, por lo tanto, n sería la cantidad de bits por cada uno de estos símbolos asociados a la transmisión. Estas probabilidades condicionales anteriormente utilizadas están definidas por la distribución gaussiana, por lo que se calculan de acuerdo a la Ecuación (4),

$$p(y|b_i = 0) = \frac{2}{n} \sum_{x_i \in C_b^0} \frac{e^{-\frac{(y-x_i)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma}, \quad (4)$$

similarmente para $p(y|b_i = 1)$.

Finalmente $p(y)$ se puede expresar como:

$$p(y) = \frac{1}{n} \sum_{x_i \in C} \frac{e^{-\frac{(y-x_i)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (5)$$

Es importante destacar que los puntos a los que se hace referencia en las ecuaciones anteriores corresponden a la posición en los ejes de coordenadas de la constelación y se analizan según los grados de libertad que ofrezca su índice de modulación o número de símbolos de la constelación.

2. DISEÑO DE LAS CONSTELACIONES NUC-1D

Para el diseño de las constelaciones NUC en 1D se utilizó el algoritmo iterativo *Nelder-Mead* el cual fue escogido por su facilidad de implementación y entendimiento [1]. Dicho algoritmo propone la optimización de los símbolos en la constelación a través de la optimización de la ecuación de capacidad de un canal BICM, definida anteriormente.

El algoritmo está compuesto por cinco pasos fundamentales, los cuales son llamados:

1. Ordering
2. Reflection (ρ)
3. Expansion (χ)
4. Contraction (γ)
5. Shrinkage (σ)

El algoritmo original propone que los parámetros deben satisfacer las condiciones siguientes: $\rho > 0$, $\chi > 1$, $\chi > \rho$, $0 < \gamma < 1$, $0 < \sigma < 1$. Las decisiones más comunes y las escogidas para utilizar son las siguientes: $\rho=1$, $\chi=2$, $\gamma=0.5$, $\sigma=0.5$.

El mismo propone que para una n cantidad de vértices, están asociadas $n+1$ funciones. También se define quien sería x , que no es más que el vector que contiene los DoF de la modulación que se esté optimizando y $f(x)$, que sería la función donde se evalúa el vector x . En nuestro caso serían:

$$x = [a_1, a_2, \dots, a_n], \quad (6)$$

"donde a sería la posición del símbolo a optimizar.

$$f(x) = -C_{BICM}. \quad (7)$$

Para formar la matriz x con los vectores correspondientes se realiza lo siguiente, donde δ es igual a 0.05:

$$\begin{aligned} x_1^{(0)} &= [x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}] \quad , \quad \text{este es tomado como vector de entrada junto a} \\ x_2^{(0)} &= [(1 + \delta)x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}] \quad , \quad x_3^{(0)} = [x_{31}, (1 + \delta)x_{32}, \dots, x_{3n}] \quad , \\ x_{n+1}^{(0)} &= [x_{n+1}, x_{(n+1)2}, \dots, (1 + \delta)x_{(n+1)n}]. \end{aligned}$$

1. Ordering

En este paso se ordenan los vectores de mayor a menor atendiendo al resultado de su $f(x)$ respectiva.

2. Reflection

Aquí se calcula un vector x_r , que está definido por la siguiente ecuación:

$$x_r = 2x_{med} - x_{n+1}; \quad (8)$$

donde $x_{med} = \sum_{i=1}^n x_i / n$.

Si la función evaluada en x_r es mayor que f_1 y menor que f_n , se escoge este vector y la iteración termina, y en la siguiente iteración el vector que ocupa el lugar x_{n+1} es reemplazado por x_r y el proceso es repetido nuevamente.

3. Expansion

Si la función evaluada en el vector reflejado es menor que la función evaluada en el vector con el mayor resultado, la expansión se calcula:

$$x_e = 3x_{med} - 2x_{n+1} \quad (9)$$

Se calcula la función evaluada en el vector x_e . Si el resultado es menor que f_r , entonces el vector expandido es seleccionado y la iteración termina. Si por el contrario el resultado es mayor o igual que f_r , se selecciona el vector x_r y la iteración termina.

4. Contraction

Si f_r es mayor o igual que f_n , se pueden formar dos diferentes tipos de *contractions*, dependiendo de f_{n+1} .

- *Outside contraction*: si $f_n \leq f_r \leq f_{n+1}$, entonces se calcula:

$$x_{oc} = 1.5x_{msd} - 0.5x_{n+1}. \quad (10)$$

Si f_{oc} es menor que f_r , se escoge el vector x_{oc} y la iteración termina. De lo contrario se pasa al paso 5.

- *Inside contraction*: si $f_r \geq f_{n+1}$, entonces se calcula:

$$x_{ic} = 0.5x_{n+1}. \quad (11)$$

Si f_{ic} es menor que f_{n+1} , se selecciona el vector x_{ic} y la iteración termina, de lo contrario se pasa al paso 5.

5. Shrinkage

Cuando ninguno de los criterios considerados anteriormente se cumple, se pasa a este estado. La función es evaluada en los n vértices de la siguiente manera:

$$v_i = x_i + \sigma(x_i - x_1) = 0.5(x_i + x_1). \quad (12)$$

El algoritmo se implementó en un *script* de **Matlab** donde se obtienen las posiciones óptimas, recalculando las capacidades y comparándolas, donde la condición de parada sería lograr la igualdad hasta cuatro lugares decimales después de la coma tanto del vector x , como de $f(x)$. Además, se implementó la ecuación del cálculo de capacidad del canal BICM en una función del **Mathematica**, la cual es capaz de integrar correctamente sin las limitantes de la función equivalente presentada en el *script* de **Matlab**.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para llevar a cabo el primer análisis, se parte de la implementación en bloques del esquema DTMB en Simulink; la representación (Fig. 2) se realiza en función del estándar GB20600 [12]. Inicialmente se llevan a cabo varias corridas de simulación en las que se analiza la probabilidad de error de bit para diferentes valores de SNR del canal AWGN. Este primer análisis es consecuente con los resultados esperados pues demuestra en función de los diferentes valores de FEC (*Forward Error Correction*) (0.4/0.6/0.8) y las diferentes modulaciones utilizadas las aptitudes correctoras del bloque codificador, así como los resultados de las BER obtenidas.

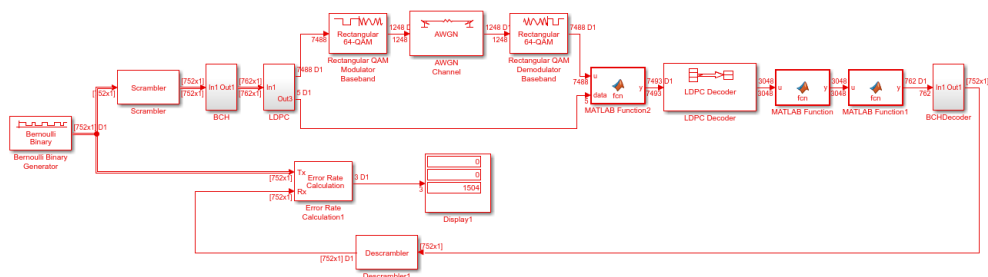
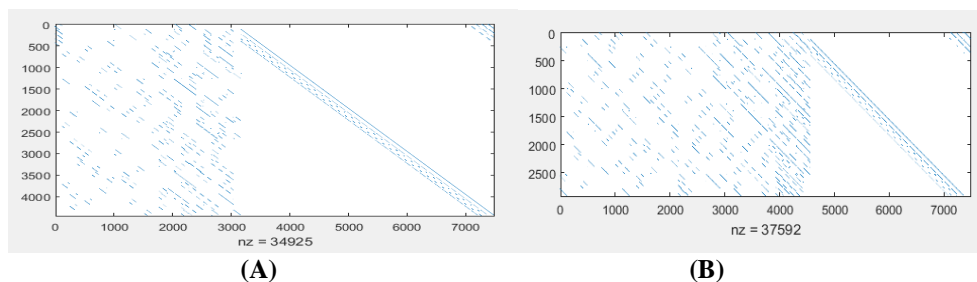


Figura 2: Representación en Simulink del esquema en bloques para el estándar DTMB a utilizar.

Además, la Fig. 3 muestra la representación de la matriz H dispersa obtenida para las tres FEC definidas por la norma cuya característica principal es la baja densidad de unos utilizada en cada caso partiendo del anexo B de la norma y obtenida a partir del código implementado. Este paso es de vital importancia para poder obtener las BER antes mostradas.



(A)

(B)

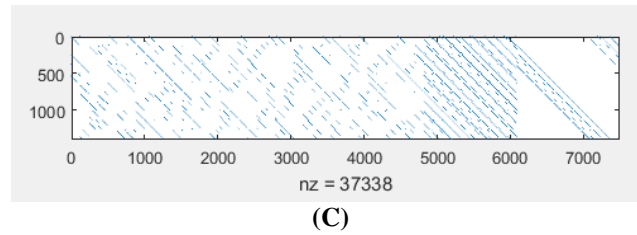


Figura 3: A, B y C. Representación de las matrices H utilizadas en cada razón de código.

Como desde el punto de vista de diseño del modelo de Nelder Mead para la optimización de las NUC, resulta imprescindible determinar los valores de SNR pues se parte de elaborar unas gráficas que muestren las curvas de VER vs SNR que describe cada razón de código para las UC. De este modo, se podrá seleccionar el valor del SNR en la región de caída en donde el valor de BER disminuye de manera gradual hacia un mínimo conclusivo. Lógicamente, el comportamiento para los esquemas de codificación en los que se le agrega mayor cantidad de bits redundantes trabajan a valores de SNR más bajos y a los que se les agrega menos poseen peor comportamiento y por tanto, peor BER. La curva a utilizar se hace logarítmica en el eje de las ordenadas (BER) para mostrar el fenómeno de un modo más claro (Fig. 4).

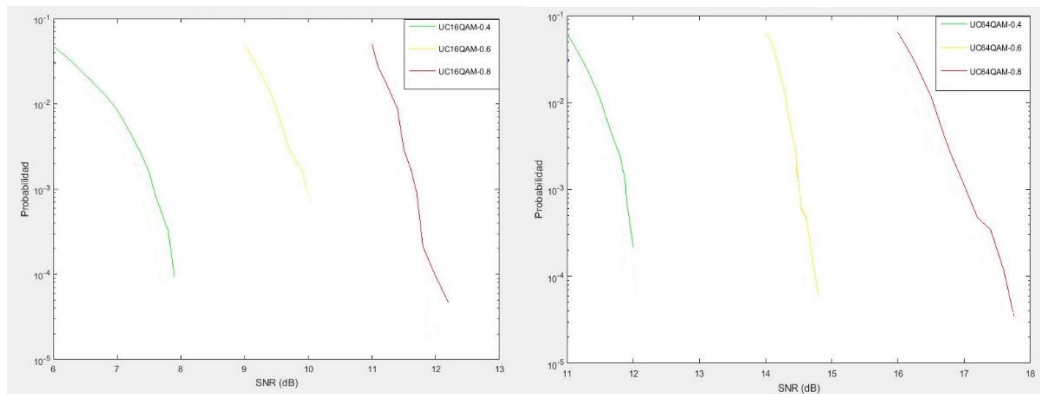


Figura 4: Representación de BERvsSNR para los diferentes modos de DTMB.

Cálculo de la capacidad BICM para el diseño de las NUC.

Para el cálculo de la capacidad se parte del esquema de modulación 16QAM. Para QAM no tiene sentido y para 32QAM no se logra pues solamente esta técnica se realiza para las modulaciones cuya cantidad de bits por símbolo es un resultado par del total de símbolos dado por $(\log_2(M))$. Esto se busca de una constelación de forma rectangular y por tanto se implementa en los casos 16, 64, 256, 1024 y 4096 QAM. En este estudio solo se llevarán a cabo los cálculos para 16 y 64 pues son los modos utilizados por el estándar.

Para el diseño de las 1D NUC se evade la característica que poseen las UC de la “uniformidad” de la distancia entre sus puntos adyacentes y se usa la acepción discutida en la Sección 2 sobre los DoF para los puntos de la nueva constelación optimizada. Recordar que estos DoFs varían en cantidad de acuerdo al índice de la constelación QAM pero como se hacen en 1D se tiene simetría respecto al cero.

La modulación 16QAM, tiene únicamente 1 DoF (Tabla 1), luego aplicando la simetría la obtención de la representación en la parte imaginaria resulta sencilla. Recordar además que se ha de partir del hecho de que la constelación uniforme tiene sus símbolos mapeados en $\{-3, -1, 1, 3\}$ a una distancia uniforme mínima entre ellos de dos, las modulaciones con índices mayores también siguen el mismo comportamiento, y se usa código Gray para representar la posición inherente de cada símbolo para las señales en cuadratura. Evaluando esta constelación en los valores de caída de SNR, para cada modo tabulado (0.4/0.6/0.8) se obtiene un nuevo valor de símbolos a mapear en función de $\{-a, -1, 1, a\}$ o $\{-a_3, -a_2, -a_1, -1, 1, a_1, a_2, a_3\}$ para el caso de 64QAM. La representación obtenida se muestra en la Tabla 2 y se grafica en la Fig. 5. Estos valores concuerdan con la representación de los mismos en función de otros métodos de diseño diferentes.

Tabla 2. Posiciones relativas de los puntos de las constelaciones diseñadas.

IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CONSTELACIONES NO UNIFORMES EN 1D EN MATLAB PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL ESTÁNDAR DTMB

| Índice de modulación (QAM) | FEC | SNR (dB) | DoF (posiciones) |
|----------------------------|-----|----------|---------------------------------------|
| 16 | 0.4 | 7.9 | a1= 3.6 |
| | 0.6 | 10 | a1= 3.45 |
| | 0.8 | 12.2 | a1= 3.45 |
| 64 | 0.4 | 12 | a1= 2.81109; a2= 5.20405; a3= 8.47988 |
| | 0.6 | 14.8 | a1= 2.98028; a2= 5.4101; a3= 8.70172 |
| | 0.8 | 17.8 | a1= 3.0659; a2= 5.51012; a3= 8.70276 |

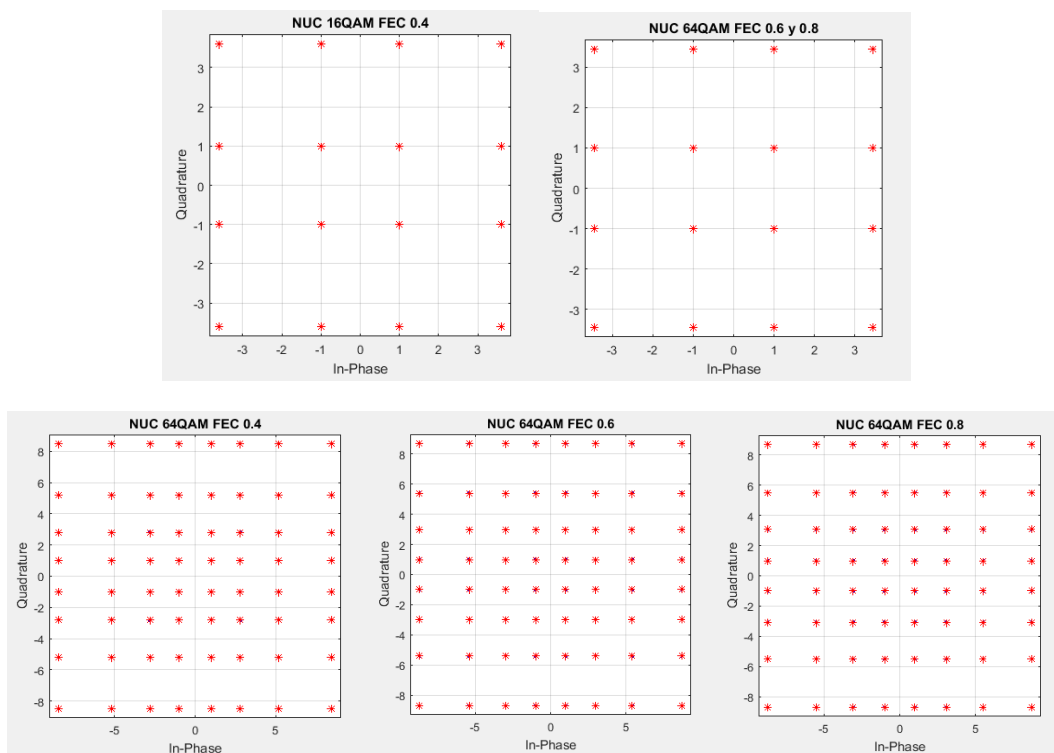


Figura 5: Representación del mapeo de símbolos para 16QAM y 64QAM de las NUC diseñadas.

A partir de la ecuación (3) para el cálculo de la capacidad BICM y utilizando el algoritmo iterativo de optimización Nelder Mead se puede demostrar el aumento de la capacidad en la constelación optimizada con respecto a las UC y una mejora de las SNR en las regiones de caída para una probabilidad de error de bit asociada. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3 solo para 16QAM/FEC y 64QAM/FEC, pero obsérvese que los graficados en las figuras 6, 7 y 8 también se incluyeron otros valores M-QAM para mostrar en un diapasón más amplio el efecto que conlleva el uso de modulaciones NUC de alto orden para el acercamiento al límite teórico de Shannon.

Tabla 3. Ganancia de capacidad para las constelaciones diseñadas.

| Índice de modulación (QAM) | FEC | SNR (dB) | Capacidad UC | Capacidad 1D NUC | Ganancia de Capacidad |
|----------------------------|-----|----------|--------------|------------------|-----------------------|
| 16 | 0.4 | 7.9 | 2.85425 | 2.86979 | 0.01554 |
| | 0.6 | 10 | 2.9277 | 2.9422 | 0.0145 |

| | | | | | |
|----|-----|------|---------|---------|---------|
| | 0.8 | 12.2 | 3.07216 | 3.08471 | 0.01255 |
| 64 | 0.4 | 12 | 2.78524 | 2.83815 | 0.05291 |
| | 0.6 | 14.8 | 3.02133 | 3.07771 | 0.05638 |
| | 0.8 | 17.8 | 3.02133 | 3.07353 | 0.05220 |

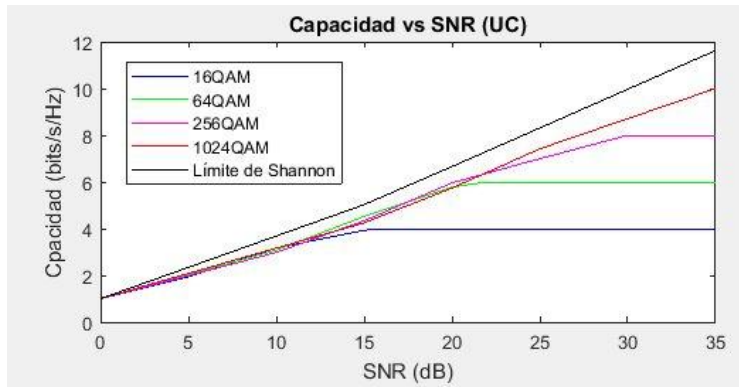


Figura 6: Capacidades de las constelaciones QAM uniformes en un canal AWGN.

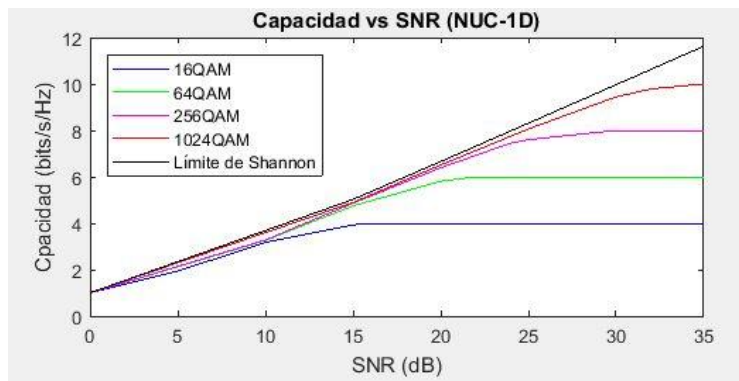


Figura 7: Capacidades de las constelaciones QAM 1D NUC en un canal AWGN.

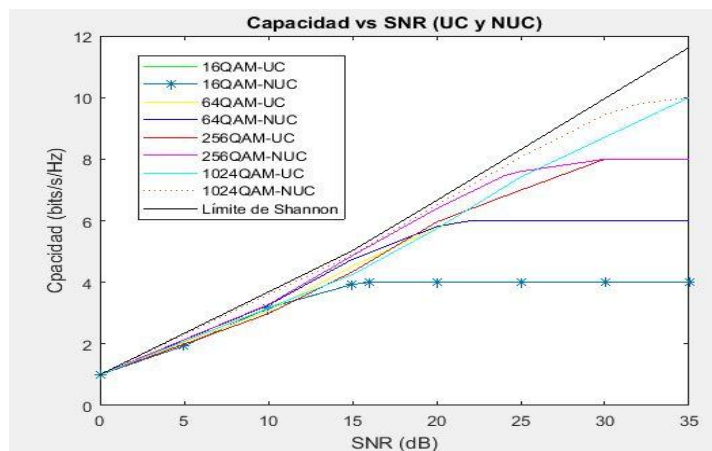


Figura 8: Capacidades de las constelaciones QAM UC y NUC en un canal AWGN.

Es necesario destacar que la implementación del programa para obtener las constelaciones, posee valores de capacidades dadas las respectivas SNR, que el valor obtenido no es un resultado maximizado “fiable”. Esta limitante está dada por los límites de integración con los que trabaja la función para integrar escogida. No obstante, para validar todos los resultados los valores para las funciones creadas en el código siempre se compararon con el programa Mathematica y con los resultados de [13].

La representación de acuerdo al estándar DTMB de las capacidades de las NUC, optimizadas en función de la SNR, se muestra en la Fig. 9, esto únicamente para el caso de 16QAM/FEC. La ganancia que se logró en todos los casos es pequeña. Esto es debido al orden de las constelaciones y los pocos grados de libertad que estas tienen para la optimización. Resultados superiores se podrían obtener o bien en función del aumento del orden de la modulación o la implementación de esquemas 2D NUC.

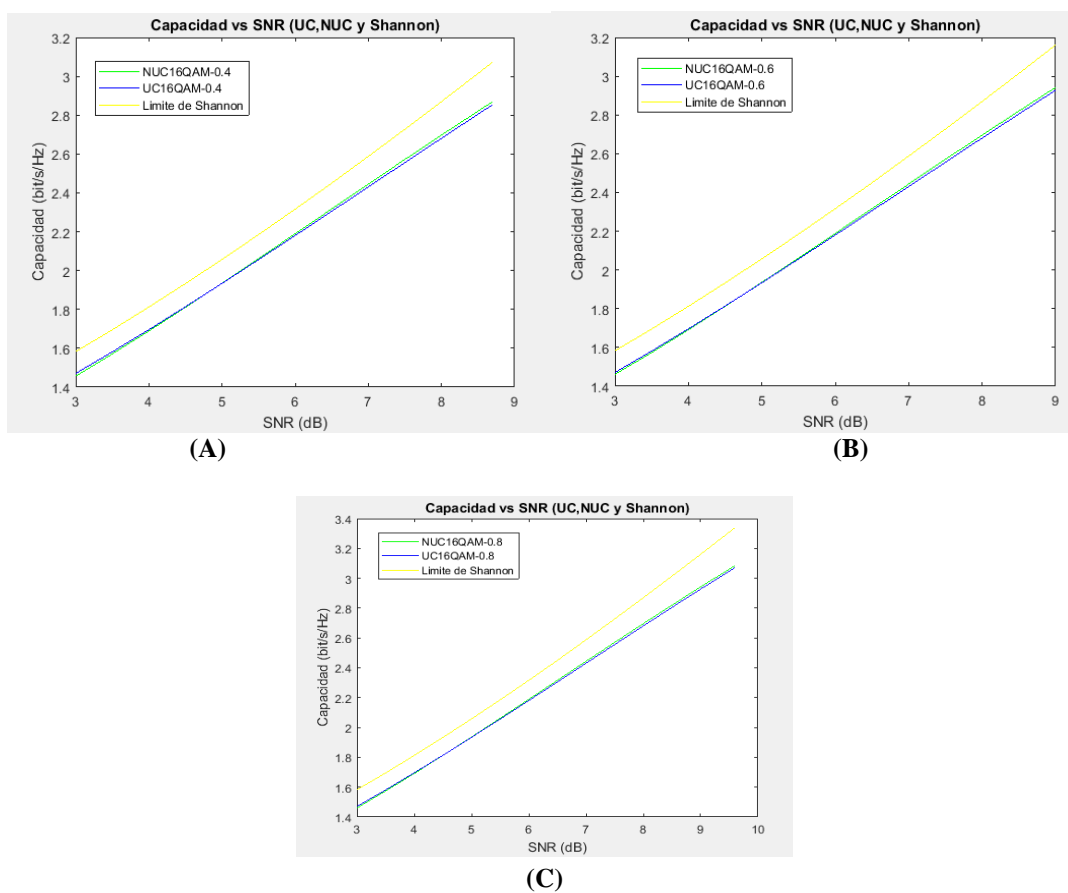


Figura 9: A, B y C. Capacidad de canal BICM de 1D NUC 16QAM.

Análisis de los valores BER vs SNR para las NUC en el esquema DTMB.

En nuevo esquema de simulación para la obtención de los valores de BER vs SNR para los valores optimizados se hace de acuerdo a la Sección 3 y se muestra en la Fig. 10. Nótese que no en todos los casos se usaron los bloques propios del Simulink sino que se elaboraron algunas funciones que están de acuerdo a lo definido por el estándar.

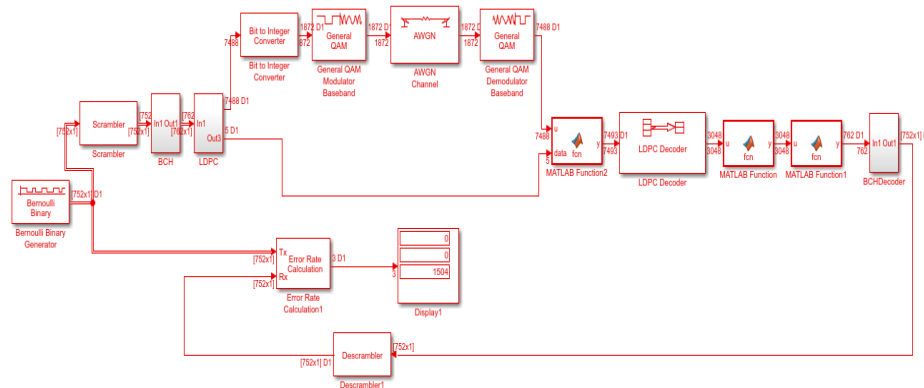


Figura 10: Representación en Simulink del esquema en bloques con NUC para el estándar DTMB a utilizar.

Al analizar la BER en función de la SNR, cuyo cuadro de resultados se pueden visualizar en la Tabla 4 (16QAM/0.4) se obtienen valores cercanos a los esperados según la bibliografía consultada, ya que, en los casos experimentados, excepto en las SNR más altas de la modulación 16QAM con FEC 0.6, el comportamiento de las NUC es mejor que el de las UC.

Tabla 4. Comparación entre las BER de las NUC y de las UC.

| Índice de modulación (QAM) 16 | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|
| FEC 0.4 | | |
| SNR (dB) | BER (UC) | BER (NUC) |
| 6 | 0.04723 | 0.03192 |
| 6.2 | 0.0359 | 0.02253 |
| 6.4 | 0.02607 | 0.01504 |
| 6.6 | 0.0185 | 0.00978 |
| 6.8 | 0.01308 | 0.00678 |
| 7 | 0.008499 | 0.004234 |
| 7.2 | 0.004687 | 0.002172 |
| 7.4 | 0.00239 | 0.001078 |
| 7.5 | 0.001594 | 0.000703 |
| 7.6 | 0.0008436 | 0.0002812 |
| 7.8 | 0.0003281 | 4.687e-5 |
| 7.9 | 9.374e-5 | 0 |

A continuación, las figuras muestran el comportamiento de las probabilidades obtenidas en cada caso como consecuencia de la aplicación del método diseñado para la optimización de las constelaciones. Para 16QAM/FEC (Fig. 11) o para 64QAM/FEC (Fig. 12) indistintamente el comportamiento es semejante; aunque cada constelación fue optimizada para el SNR en el que la probabilidad de error de bit disminuía en varios órdenes. En cada caso, la conducta del parámetro BER con relación a la UC tiende a disminuir; específicamente para valores de SNR por debajo de los que la constelación fue optimizada.

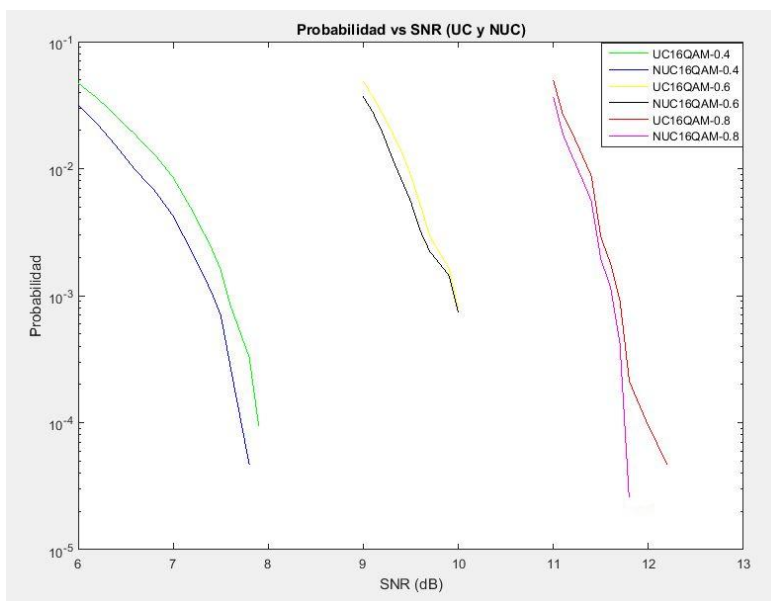


Figura 11. Comparación entre las probabilidades de UC y NUC en un canal AWGN.

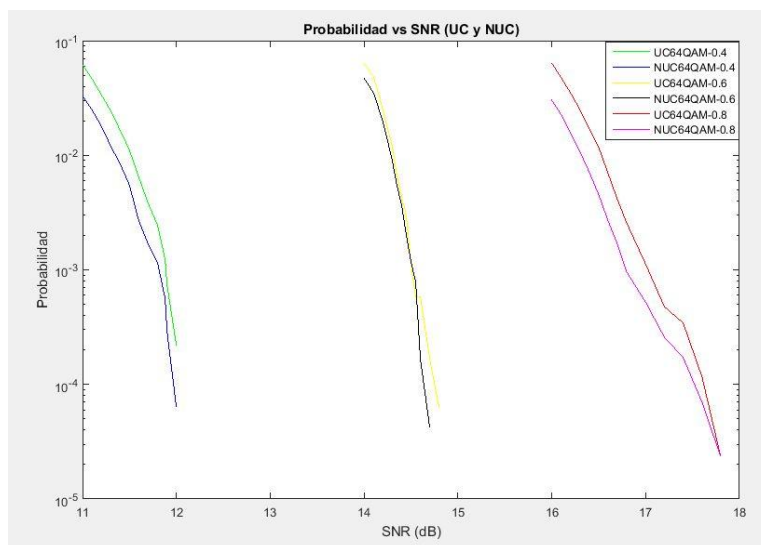


Figura 12. Comparación entre las probabilidades de UC y NUC en un canal AWGN.

CONCLUSIONES

Las técnicas de modulaciones NUC son basadas en constelaciones cuyas distancias no son uniformes y la ubicación de sus puntos varía dependiendo de la capacidad del canal BICM la cual a su vez obedece a la SNR, el índice y el tipo de modulación, así como la distribución de sus bits en los símbolos (Gray o Binaria). Para simular el impacto de las 1D NUC en el estándar DTMB se desarrolló un algoritmo basado en el modelo Nelder Mead que permitiera obtener una mejora gradual con relación a las UC. Los resultados de las simulaciones realizadas muestran una mejora del desempeño del estándar DTMB en cuanto a la capacidad del canal y el SNR mínimo de recepción de los modos optimizados. Este resultado se traduce en un aumento de la cobertura del servicio de TDT si el estándar DTMB utilizara las NUC propuestas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al claustro de profesores de la Facultad de Eléctrica en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, que de una forma u otra apoyaron en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] M. Fuentes Muela, «Non-Uniform Constellations for Next-Generation Digital Terrestrial Broadcast Systems», 2017.
- [2] R. ŠTUKAVEC y T. KRATOCHVÍL, «Simulation and Measurement of the Transmission Distortions of the Digital Television DVB-T/H: Part 2: Hierarchical Modulation Performance.», *Radioengineering*, vol. 19, n.º 3, 2010.
- [3] D. A. Karpuk y C. Hollanti, «Locally diverse constellations from the special orthogonal group», *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, n.º 6, pp. 4426-4437, 2016.
- [4] S. P. Herath, N. H. Tran, y T. Le-Ngoc, «Rotated multi-D constellations in Rayleigh fading: Mutual information improvement and pragmatic approach for near-capacity performance in high-rate regions», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, n.º 12, pp. 3694-3704, 2012.
- [5] N. S. Loghin, J. Zöllner, B. Mouhouche, D. Ansorregui, J. Kim, y S.-I. Park, «Non-uniform constellations for ATSC 3.0», *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 62, n.º 1, pp. 197-203, 2016.
- [6] J. Zöllner y N. Loghin, «Optimization of high-order non-uniform QAM constellations», en *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2013 IEEE International Symposium on*, 2013, pp. 1-6.
- [7] G. Foschini, R. Gitlin, y S. Weinstein, «Optimization of two-dimensional signal constellations in the presence of Gaussian noise», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 22, n.º 1, pp. 28-38, 1974.
- [8] J. Barrueco *et al.*, «Combining advanced constellations and SSD techniques for optimal BICM capacity», en *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2015 IEEE International Symposium on*, 2015, pp. 1-4.
- [9] B. Mouhouche, D. Ansorregui, y A. Mourad, «High order non-uniform constellations for broadcasting UHD TV», en *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, 2014, pp. 600-605.
- [10] E. Fontes Pupo, R. Díaz Hernández, y Y. Acosta Cintado, «Constelaciones No-Uniformes en 1D para el estándar DTMB», *Ing. Electrónica Automática Comun.*, vol. 39, n.º 1, pp. 62-72, 2018.
- [11] J. Barrueco *et al.*, «Constellation Design for Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM) Systems in Advanced Broadcast Standards», *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 63, n.º 4, pp. 603-614, 2017.
- [12] Standardization Administration of the People's Republic of China., «GB 20600-2006, Framing Structure, Channel Coding and Modulation For Digital Television Terrestrial Broadcasting System (DTMB).» China-2006.
- [13] J. Stott, «CM and BICM limits for rectangular constellations», *BBC Res. Dev. WHP 257*, 2012.

SOBRE LOS AUTORES

Sandra Machado Zurita graduada de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica en el 2018 en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Irina Siles-Siles, graduada de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica en el 2007 en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, perteneciente al claustro de profesores del Departamento de Telecomunicaciones, profesor asistente del colectivo de Radiocomunicaciones, Máster en Telemática (UCLV, 2016). Sus intereses de investigación se centran en: codificación de fuente y canal, asignación dinámica del espectro, televisión digital, nueva generación de redes de comunicaciones.

Erik Ortiz Guerra, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en 2008, Master en Telemática en 2011 y Doctor en Ciencia técnicas en 2015 todos en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV). Profesor Auxiliar Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones UCLV. Sus intereses de investigación se centran en: mecanismos de acceso al medio en redes radio cognitivas y redes inalámbricas de sensores, comunicación M2M, internet de la cosas.

Julio Cesar Pérez García, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, graduado en el 2015 de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villa (UCLV), Profesor Instructor en el Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Sus intereses de investigación son fundamentalmente los mecanismos de acceso al medio en redes radio cognitivas y redes inalámbricas de sensores, redes MANET y VANET, internet de la cosas.