

دراسة التجميع التعامدي بتقسيم التردد OFDM في البث المرئي الرقمي الأرضي DVB-T و محاكاتها في بيئة الماتلاب

الدكتور علي زيد*

(تاريخ الإيداع 29 / 10 / 2009. قُبل للنشر في 4 / 5 / 2011)

□ ملخص □

يمثل التجميع التعامدي بتقسيم التردد (OFDM) Orthogonal frequency division multiplexing إحدى تقنيات التعديل المختارة للاتصالات اللاسلكية. يمكن أن ينتج OFDM معدلات كبيرة من البيانات مع مناعة كافية لما يسيء لقناة الاتصال الراديوية. الهدف من هذا المقال هو تمثيل الإشارات الأساسية في بيئة الماتلاب للتجميع التعامدي بتقسيم التردد OFDM في مرحلتي الإرسال و الاستقبال، في القناة الطبيعية و تزويد الوصف لكل مرحلة من الخطوات المتضمنة. ولهذا الغرض نستعمل كمثال؛ أحد إشارات OFDM المقترحة للإذاعة المرئية الرقمية (DVB) digital video broadcasting المعيارية للبث المرئي الرقمي الأرضي DVB-T.

الكلمات المفتاحية: التجميع التعامدي بتقسيم التردد (OFDM)، بث الفيديو الرقمي (DVB)، معيار البث المرئي الرقمي الأرضي DVB-T، تحويل فورييه السريع (FFT).

* مدرس - قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية - جامعة حلب - سورية.

A Study of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) in Terrestrial Digital Television (DVB-T) and Simulation in Matlab.

Dr. Ali Zeid*

(Received 29 / 10 / 2009. Accepted 4 / 5 / 2011)

□ ABSTRACT □

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is becoming one of the chosen modulation techniques for wireless communication. OFDM can provide large data rates with sufficient robustness to radio channel impairments. The purpose of this report is to simulate basic processing involved in the generation and reception of an OFDM signal in a physical channel and to provide a description of each of the steps involved. For this purpose, we shall use, as one example, one of the proposed OFDM signals of the digital video broadcasting (DVB) standard for European terrestrial DVB (DVB-T).

Key Words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Digital Video Broadcasting (DVB), Terrestrial DVB (DVB-T), Fast Fourier Transferring (FFT)

*Assistant professor, Department of Communication, Faculty of Electric and Electronic, University of Aleppo , Syria.

مقدمة:

في مخطط OFDM، يوجد عدد كبير من القنوات الفرعية أو الحوامل الفرعية ضيقة المجال التي ترسل على التوازي، والتي تشترك جميعها في عرض مجال الإرسال المتوافر. نظرياً، يكون التباعد بين الحوامل صغيراً وهذا ما يجعل الطيف المستخدم مدمجاً جداً. ما يلفت الانتباه في OFDM يكون بشكل أساسي بسبب التداخل متعدد المسارات في المستقبل. ينشأ عن التداخل متعدد المسارات تأثيران أساسيان: ظاهرة الخفوت Fading ذات الانتقائية الترددية (فرق الطور المقابل لفرق معين بين طولي المسارين يعتمد على التردد)، والتداخل بين الرموز intersymbol interference (ISI).

يتم التغلب على التأثيرات السلبية الناتجة عن الانتشار المتعدد المسارات باستخدام قناة ذات حزمة ضيقة، والتعديل بمعدل رموز منخفض جداً، التي تجعل الرموز أكثر طولاً من الاستجابة النبضية للقناة، أي تصبح متطلبات الاستجابة النبضية للقناة أبسط.

استعمال تصحيح الخطأ القوي للرموز مع الزمن والتردد يجعل التردد الناتج أقوى ضد ضعف الانتقائية الترددية، وإدخال فترة أمان إضافية بين رموز OFDM، يمكن أن يخفف تأثيرات ISI بدرجة كبيرة. هناك عقبتان أساسيتان مع المدى الديناميكي الكبير للإشارة و الذي يرمز له بنسبة القمة إلى المتوسط (PAR) peak-to average ratio والحساسية العالية إلى أخطاء التردد.

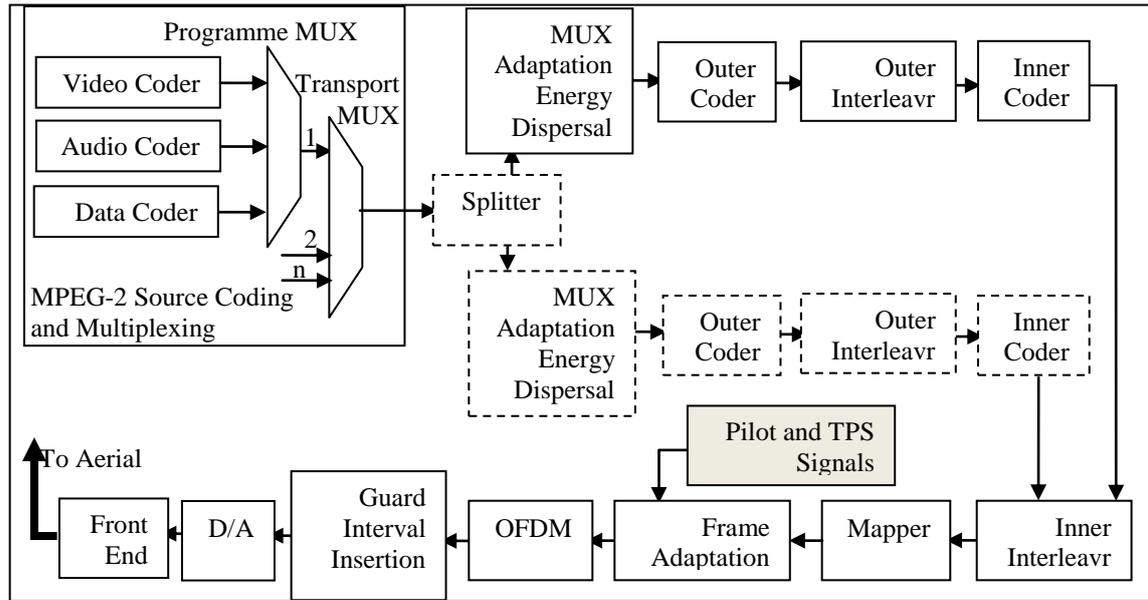
المخطط الصندوقي للمعيار الأوروبي الأرضي DVB-T موضح في الشكل (1)، [1]. أكثر العمليات الموصوفة في هذا المخطط تكون محققة من خلال المعالجة الرقمية للإشارة (DSP) digital signal processing. لكن المشاكل المذكورة سابقاً تكون محققة في القناة الطبيعية، وبمعنى آخر في خرج هذا النظام.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى تزويد وصف كل الخطوات المشتركة في توليد الإشارات الخاصة OFDM، واستخدام بيئة الماتلاب من أجل إظهارها. و في كلمات أخرى سيركز هذا المقال على الصناديق الخاصة OFDM، D/A، والواجهة الأمامية للشكل (1).

طرائق البحث ومواده:

يتضمن معيار DVB-T تعليمات الإرسال فقط، بينما نظام الاستقبال يكون مفتوحاً للمنافسة أمام المنتجين. لذلك، نحن سنحاول تقديم نظام استقبال عام و لديه كامل مواصفات النظام.



الشكل (1). المخطط الصندوقي لمرسال البث المرئي الرقمي DVB-T.

النتائج والمناقشة:

1 - إرسال OFDM

1-1 مثال DVB-T

الوصف الدقيق لنظام OFDM يمكن إيجاده في [2] و [3]، حيث يمكن أن نجد علاقة OFDM برمز واحد و

يبدأ $t = t_s$ كما يلي :

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+\frac{N_s}{2}} \exp \left[j2\pi \left(f_c - \frac{i+0.5}{T} \right) (t - t_s) \right] \right\} \quad (1)$$

$$\text{for } t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s(t) = 0, \text{ for } t < t_s, \text{ and } t > t_s + T$$

d_i : تعبر عن الرموز العقدية للتعديل.

N_s : تعبر عن عدد الحوامل الفرعية.

T : تعبر عن زمن الدور.

f_c : تعبر عن تردد الحامل.

ويتم التعبير عن الصيغة الخاصة للمعادلة (1) المعطاة في معيار DVB-T بواسطة العلاقة التالية:

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{67} \sum_{k=k_{min}}^{k_{max}} C_{m,l,k} \cdot Q_{m,l,k}(t) \right\} \quad (2)$$

حيث تكون $Q_{m,l,k}(t)$ كما يلي:

$$Q_{m,l,k} = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k'}{TU} (t - \Delta - l.T_s - 68m.T_s)} & (l + 68.m)T_s \leq t \leq (l + 68.m + 1)T_s \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

حيث تكون الرموز المذكورة كما يلي:

k : عدد الحوامل.

l : عدد رموز التجميع المتعامد بتقسيم التردد.

m : عدد إطارات النقل.

K : عدد الحوامل المنقولة.

T_s : رمز الدور.

T_U : مقلوب التباعد بين الحوامل.

Δ : مدة المحافظة على الفراغ.

f_c : التردد المركزي لإشارة الترددات الراديوية.

$$k' = k - \frac{(k_{max} + k_{min})}{2}$$

$C_{m,0,k}$: الرمز العقدي للحمال k لرمز المعلومة (Data) رقم 1 في الإطار رقم m .

$C_{m,1,k}$: الرمز العقدي للحمال k لرمز المعلومة (Data) رقم 2 في الإطار رقم m .

$C_{m,67,k}$: الرمز العقدي للحمال k لرمز المعلومة (Data) رقم 68 في الإطار رقم m .

من المهم تحقيق المعادلة (2) التي تصف نظام العمل. المحاكاة التي سوف نقوم بها سنتركز على النمط $2k$ من أجل معيار DVB-T. و هذا النمط يكون مهماً من أجل التوسع في مفهوم الاستقبال الخاص بالنقل لمعيار DTV. الإشارات المرسله تكون مرتبطة في إطارات، و كل إطار له مدة T_F و يحتوي على 68 رمز OFDM. وكل أربعة إطارات تشكل إطاراً كبيراً واحداً. يتشكل كل رمز من مجموعة حوامل $k=1.705$ في النمط $2k$ والمنقولة بمدة زمنية T_s . إن الجزء المفيد الذي مدته الزمنية T_U وفترة الأمان Δ يشكلان الفترة T_s . تكون القيم العددية الخاصة ببارامترات OFDM و من أجل النمط $2k$ معطاة في الجدول (1).

الجدول(1). القيم العددية الخاصة ببارامترات OFDM بالنسبة للنمط $2k$.

Parameter	2k mode			
Elementary period T	7/64 μ s			
Number of carriers K	1,705			
Value of carrier number K_{min}	0			
Value of carrier number K_{max}	1,704			
Duration T_U	224 μ s			
Carrier spacing $1/T_U$	4,464 Hz			
Spacing between carriers K_{min} and $K_{max}(K-1)/T_U$	7.61 MHz			
Allowed guard interval Δ/T_U	1/4	1/8	1/16	1/32
Duration of symbol part T_U	2,048xT 224 μ s			
Duration of guard interval Δ	512xT 56 μ s	256xT 28 μ s	128xT 14 μ s	64xT 7 μ s
Symbol duration $T_s = \Delta + T_U$	2,560xT 280 μ s	2,304xT 252 μ s	2,176xT 238 μ s	2,112xT 231 μ s

سنتناول في هذه الفقرة التطبيق العملي للعلاقة (2)، الذي أصبح قابلاً للتحقيق بعد توافر معالجة الإشارة الرقمية DSP. حيث إن توافر DSP جعل من تحويل فورييه السريع FFT ممكناً [4]. لذا، سوف نركز في بقية المقال على هذا التطبيق مستخدمين القيم و المراجع DVB-T كمثال.

إذا اعتبرنا العلاقة (2) من أجل الفترة الزمنية من $t=0$ إلى $t=T_s$ سنحصل على العلاقة التالية :

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{k_{min}}^{k_{max}} C_{0,0,k} e^{j2\pi k'(t-\Delta)/T_U} \right\} \quad (4)$$

$$. \text{حيث: } k' = k - \frac{(k_{max}+k_{min})}{2}$$

نجد أن هناك تطابقاً واضحاً بين العلاقة (4) و علاقة تحويل فورييه المنقطع العكسي IDFT التالية:

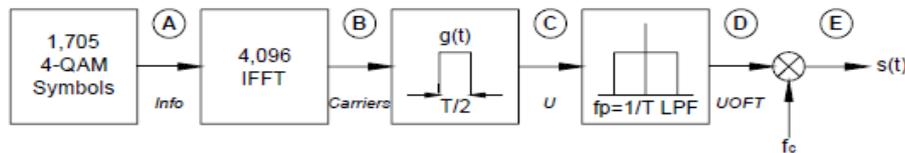
$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} X_q e^{j2\pi \frac{nq}{N}} \quad (5)$$

توجد خوارزميات FFT المختلفة جعلت من DFT ومعكوساتها أكثر سهولة للتطبيق، وذلك بتوليد N عينة X_n المقابلة للجزء المفيد، ذي الطول T_U ، من أجل كل رمز. تضاف فترة الأمان بأخذ نسخة من آخر $N\Delta/T_U$ من هذه العينات ووضعها في نهاية الفترة. عندها يعطي التحويل التالي الأعلى الإشارة الحقيقية $S(t)$ المركزة حول التردد المركزي f_c .

2- تطبيق FFT

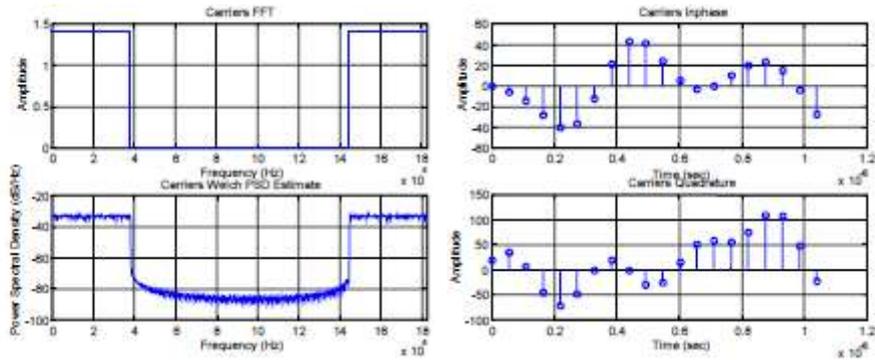
الأهمية الأولى التي تؤخذ بالحسبان هي كون طيف OFDM مركزاً حول التردد المركزي f_c ، و بمعنى آخر الحامل الفرعي (1) يكون (7.61/2 MHz) على يسار الحامل، و الحامل الفرعي (1.705) يكون (7.61/2 MHz) على اليمين. بطريقة بسيطة يمكن إنجاز المركزة و تكون باستخدام 2N-IFFT و $T/2$ كفترة أولية [2]. كما نرى على القائمة (1)، فترة الرمز بالنسبة إلى OFDM، T_U ، تكون محددة على اعتبار أن 2N-IFFT، $(N=2.048)$ ، لذا، سوف نستعمل 4.096-IFFT.

يكون المخطط الصندوقي لمرحلة واحدة من OFDM موضحاً في الشكل (2)، حيث أشرنا إلى المتغيرات المستعملة في بيئة الماتلاب. تكون المرحلة التالية من أجل أن يكون زمن المحاكاة ملائماً. يكون T معرفاً كدور أولي من أجل الإشارة الأساسية، ولكن من الآن سوف نقوم بتمثيل إشارة تمرير منخفض، و يجب علينا أن نربط بينه وبين زمن الدور، $1/R_s$ ، والتي تعتبر أصغر مرتين على الأقل من التردد الحامل. ومن أجل التبسيط، نستعمل علاقة عدد صحيح $R_s = 40/T$. هذه العلاقة تعطي تردداً للحامل تقريباً 90 MHz. الآن سوف نقوم بعمل وصف لكل مرحلة محددة بحرف على الشكل (2).



الشكل (2). المخطط الصندوقي لمرحلة OFDM في الإرسال.

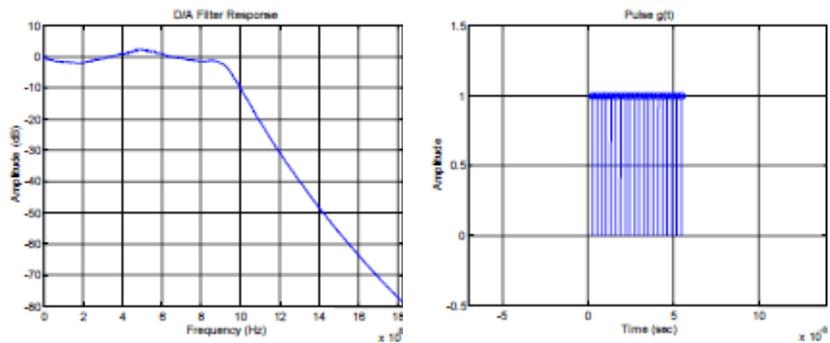
سنقوم بإضافة $(4.096-1.705=2.391)$ صفر كما ورد في [2]، إلى إشارة المعلومات Info الموضحة في (A)، و ذلك حتى يتسنى لنا أخذ عينات بمعدل فائق، $2X$ ، ومن أجل مركزة الطيف. يمكننا مشاهدة هذه العملية في الشكل (3) و (4)، حيث حوامل الإشارات المستخدمة بدور زمني مقداره $T/2$. و كذلك تبدو الحوامل كإشارة المجال الأساسي المتقطعة زمنياً.



شكل (3). الاستجابة الترددية لإشارة الحوامل في النقطة (B).

شكل (3). الاستجابة الزمنية لإشارة الحوامل في النقطة (B).

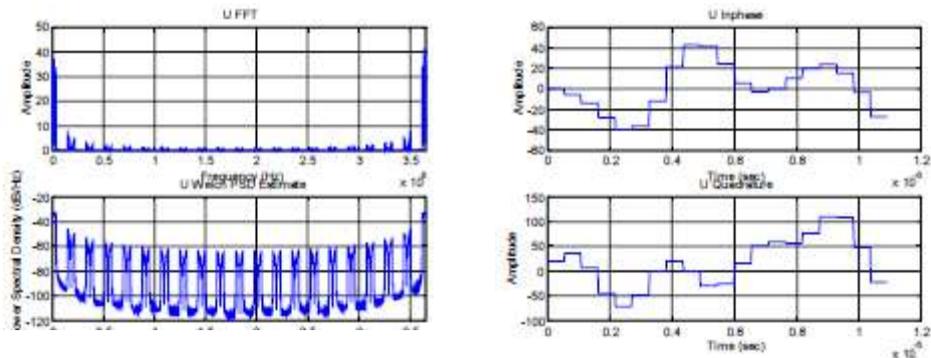
يمكننا استخدام هذه الإشارة في تمثيل المجال الزمني المتقطع للمجال الأساسي. ولكن يجب علينا أن نتذكر بأن عوائق OFDM الرئيسية تحدث في التمثيل الزمني المستمر، لذا؛ يجب علينا أن نقوم بتزويد أداة من أجل محاكاة هذه الأخيرة. وتكون الخطوة الأولى بإنتاج إشارة مستمرة في المجال الزمني، لتطبق على مرشح النقل، $g(t)$ ، على حوامل الإشارة العقدية. ويكون شكل النبضة موضحاً في الشكل (5)، وتكون الاستجابة الترددية لمرشح النقل في الشكل (6).



شكل (6). استجابة مرشح النقل.

شكل (5). شكل النبضة $(g(t))$.

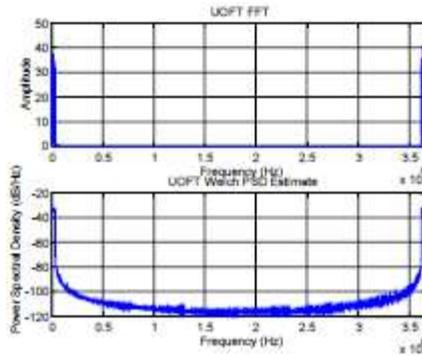
يكون الخرج الناتج عن مرشح النقل موضحاً في الشكل (7) بالنسبة للمجال الزمني، والشكل (8) بالنسبة للمجال الترددي.



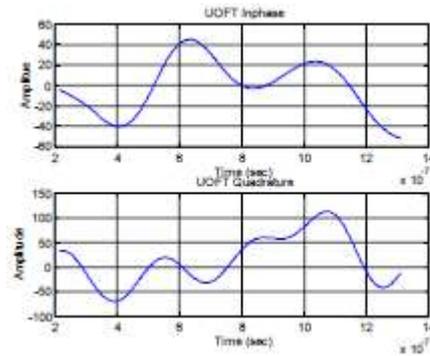
شكل (8). الاستجابة الترددية لإشارة U في النقطة (C).

شكل (7). الاستجابة الزمنية لإشارة U في النقطة (C).

نلاحظ بأن الاستجابة الترددية الموضحة في الشكل (8)، تكون دورية كما هو متوقع من الاستجابة الترددية للنظام المتقطع زمنياً [5]. وعرض مجال التمرير لطيف موضح أيضاً في هذا الشكل والتي تكون معطاة من خلال R_s . إن دور الإشارة $U(t)$ يكون $2/T$ ، ويكون لدينا مجال التمرير لمرشح إعادة البناء $(-7.61=10.675 \text{ MHz})$ $(2/T=18.286)$. إذا كنا قد استخدمنا N-IFFT فسيكون لدينا مجال التمرير لمرشح إعادة البناء كما يلي: $(-7.61=1.533 \text{ MHz})$ $(1/T=9.143)$ ، لذا؛ نكون بحاجة إلى قطع دوري حاد جداً، وهذا ما يكون معقداً جداً في مرشح إعادة البناء وذلك من أجل تجنب تشويه التموج aliasing. إن مرشح إعادة البناء المقترح أو D/A والذي تكون الاستجابة الترددية له مبينة في الشكل (6)، يكون عبارة عن مرشح بيتز ورث من المرتبة 13 وتردد القطع تقريباً $1/T$. يكون خرج المرشح موضحاً في الشكل (9) و (10).



شكل (10). الاستجابة الترددية للإشارة UOFT في النقطة (D).



شكل (9). الاستجابة الزمنية للإشارة UOFT في النقطة (D).

أول شيء ممكن ملاحظته هو التأخير والذي يكون تقريباً $2 \times 10^{-7} \text{ Sec}$ وينتج عن عملية الترشيح. ويمكن أن نعلق بأن هذا الشيء كان متوقعاً من اللحظة التي أخذنا فيها الطيف الأساسي فقط. لذلك يجب علينا أن نتذكر بأن الحوامل (من 853 إلى 1.705) تتوضع على يمين التردد الصفري، والحوامل (من 1 إلى 852) تتوضع على يسار التردد $4 f_c \text{ Hz}$.

الخطوة القادمة تؤدي إلى التعديل المطالي المترابح المتعدد للمجالين الجانبيين $UOFT(t)$. في هذا التعديل تكون الإشارة المتفقتة بالطور هي $m_I(t)$ ، والإشارة المتعامدة مع الإشارة هي $m_Q(t)$ ، وتكون معدلة وفق العلاقة التالية:

$$S(t) = m_I(t) \cos(2\pi f_c t) + m_Q(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (6)$$

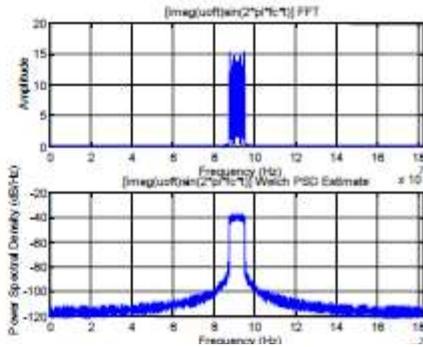
و بالتالي يمكن نشر العلاقة (4) كما يلي:

$$S(t) = \sum_{k=K_{min}}^{K_{max}} Re(C_{0,0,k}) \cos \left[2\pi \left(\left(\frac{k - \frac{K_{max} - K_{min}}{2}}{T_U} + f_c \right) t - \frac{\Delta}{T_U} \right) \right] - \sum_{k=K_{min}}^{K_{max}} Im(C_{0,0,k}) \sin \left[2\pi \left(\left(\frac{k - \frac{K_{max} - K_{min}}{2}}{T_U} + f_c \right) t - \frac{\Delta}{T_U} \right) \right] \quad (7)$$

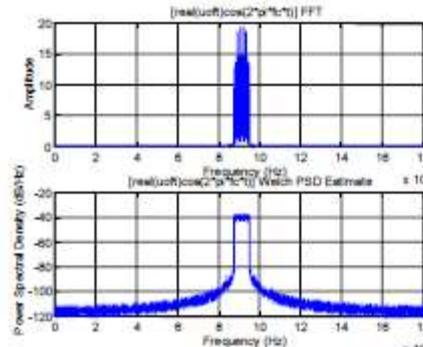
حيث يمكننا معرفة الإشارة والإشارة المترابطة كأقسام حقيقية وتخيلية $C_{m,l,k}$ ، وهي رموز 4-QAM على التوالي.

العملية الموافقة لتحويل فورييه السريع العكسي IFFT تكون كما يلي:

$S(t) = U0ft_1(t) \cos(2\pi f_c t) - U0ft_0(t) \sin(2\pi f_c t)$ (8)
وتكون الاستجابة الترددية لكل جزء من العلاقة (8) موضحة في الشكل (11) و (12).

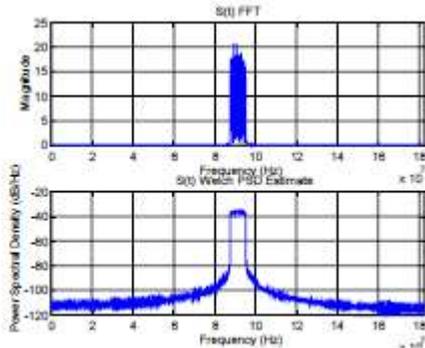


شكل (12). الاستجابة الترددية للإشارة $.U0ft_0(t) \sin(2\pi f_c t)$

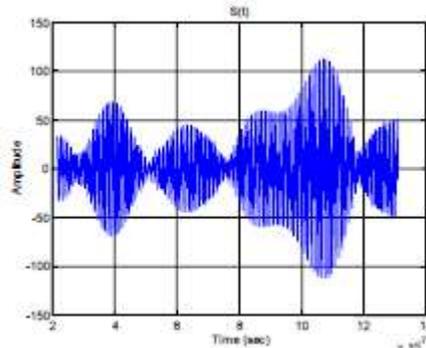


شكل (11). الاستجابة الترددية للإشارة $.U0ft_1(t) \cos(2\pi f_c t)$

وتكون الاستجابة الترددية والزمنية للإشارة الكاملة مبيّنة في الشكل (13) و (14).

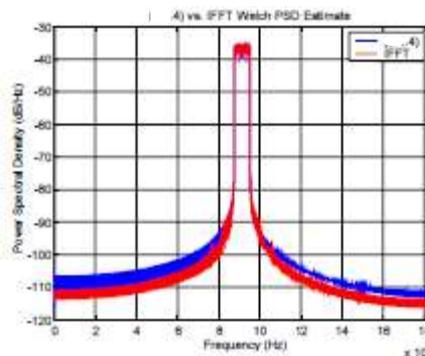


شكل (14). الاستجابة الترددية للإشارة $S(t)$ في النقطة (E).

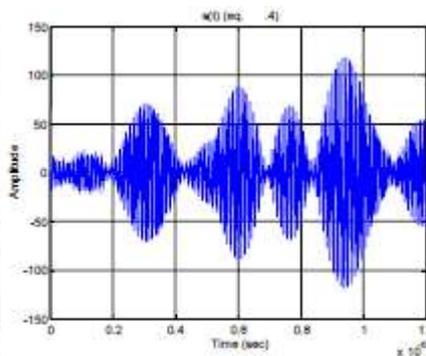


شكل (13). الاستجابة الزمنية للإشارة $S(t)$ في النقطة (E).

يمكننا أن نلاحظ القيمة الكبيرة لمعدل القمة إلى المتوسط PAR في الاستجابة الزمنية على الشكل (13). أخيراً، الاستجابة الزمنية التي تستخدم المحاكاة المباشرة للعلاقة (4)، تكون موضحة في الشكل (15)، وتكون الاستجابة الترددية المباشرة، وتطبيق 2N-IFFT على الشكل (16).



شكل (16). الاستجابة الترددية للمحاكاة المباشرة للعلاقة (4) و IFFT.

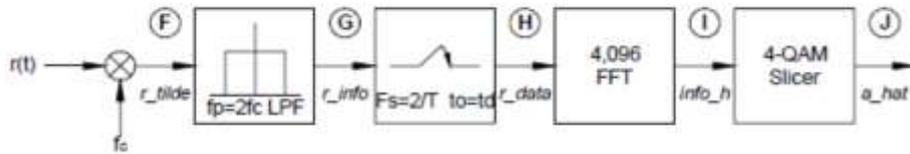


شكل (15). الاستجابة الزمنية للمحاكاة المباشرة للعلاقة (4).

بمقارنة مباشرة بين الشكل (13) والشكل (15)، نلاحظ الاختلاف في الاصطفاغ الزمني والمطال، ودراسة الاستجابة الترددية الموضح في الشكل (16)، تبين اختلافات المطال، و لكن الأطياف تكون متطابقة تقريباً. ونحن كنا نتوقع عدم التطابق التام منذ أن وجدنا نتائج مختلفة بين 1.705-IFFT، مقابل 4.096-IFFT التي تستخدم نفس البيانات المساهمة.

3- استقبال OFDM

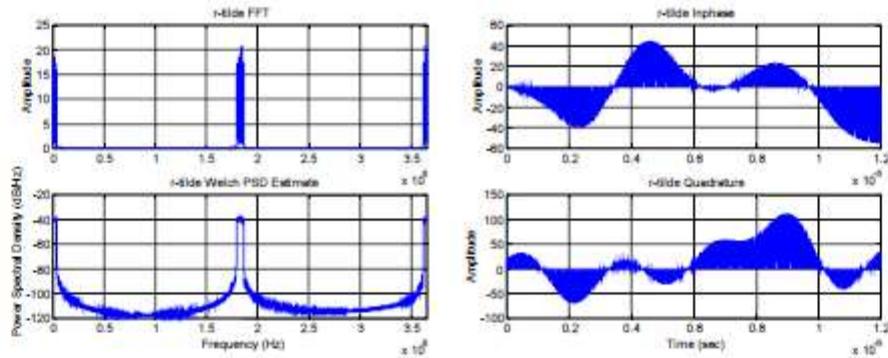
كما ذكرنا سابقاً، يكون تصميم مستقبل OFDM مفتوحاً، بمعنى آخر، توجد معايير إرسال وحيدة، ولكن البحث والإبداع يكونان في المستقبل. مثال على ذلك؛ مشكلة حساسية التردد، التي تظهر بشكل رئيسي في قضية تنبؤ قناة الإرسال، الشيء الأساسي الذي يقدم إلى المستقبل، لذا؛ سوف نقوم في هذا المقال، بتقديم بناء مستقبل أساسي. المستقبل بشكل أساسي هو الذي يقوم بعمليات معاكسة للعمليات التي تمت في قسم الإرسال، و هو موضح في الشكل (17).



الشكل (17). المخطط الصندوقي لمرحلة OFDM في المستقبل.

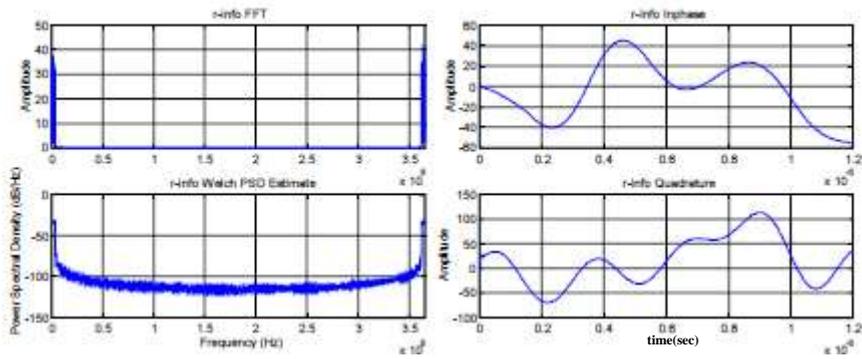
يكون نظام OFDM حساساً جداً لعمليات التزامن و التغيرات الترددية المقابلة [2]. حتى في هذه البيئة المثالية للمحاكاة، يجب علينا أن نأخذ بالحسبان التأخير الناتج عن عملية الترشيح. ومن أجل محاكاتها فإن التأخير يكون ناتجاً عن عملية فك التعديل وإعادة البناء حوالي $t_d = 64/R_s$.

ويكون هذا التأخير كافياً حتى يعيق عملية الاستقبال، و هو سبب بالاختلافات الطفيفة التي يمكن أن نراها بين الإشارات المرسل والمستقبل. على سبيل المثال نقارن الشكل (4) مع الشكل (23). وإذا، ما تمت العناية بالتأخير فإن بقية عملية الاستقبال تكون بسيطة. لقد حددنا أسماء متغيرات المحاكاة كما في عملية الإرسال، وكل نتائج عملية المعالجة في الاستقبال للشكل (17)، تكون مقدمة في الأشكال (18) و حتى (25).



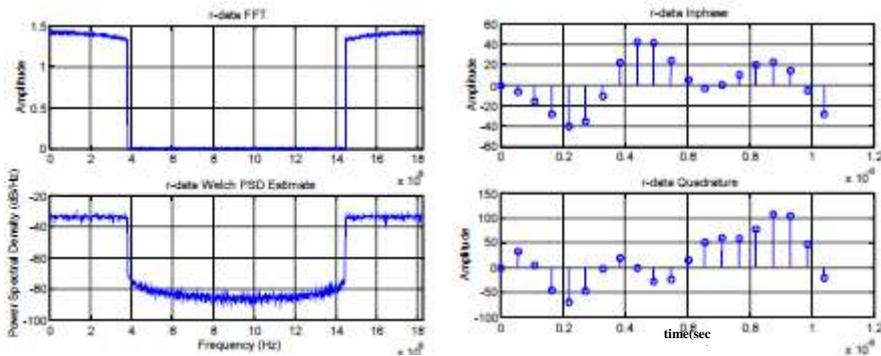
شكل (19). الاستجابة الترددية للإشارة r_tiled في النقطة (F).

شكل (18). الاستجابة الزمنية للإشارة r_tiled في النقطة (F).



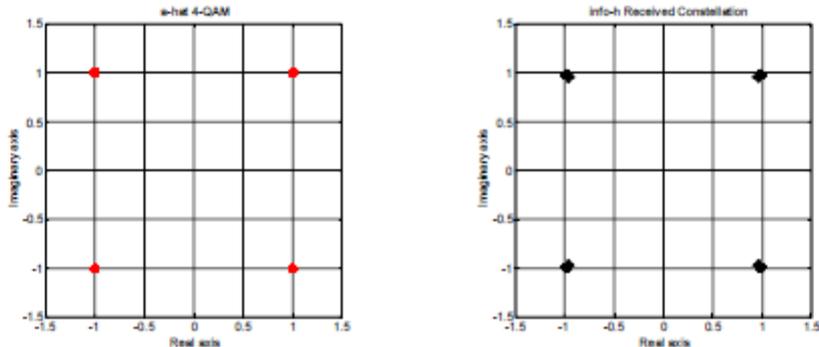
شكل (20). الاستجابة الزمنية للإشارة r_info في النقطة (G).

شكل (21). الاستجابة الترددية للإشارة r_info في النقطة (G).



شكل (22). الاستجابة الزمنية للإشارة r_data في النقطة (H).

شكل (23). الاستجابة الترددية للإشارة r_data في النقطة (H).



شكل (24). مجموعة $info_h$.

شكل (25). مجموعة a_hat .

الاستنتاجات والتوصيات:

يمكننا أن نجد العديد من فوائد OFDM ، ولكن ما زالت هناك العديد من المشاكل التي تحتاج إلى حل. تمثيل الإشارات الأساسية في بيئة الماتلاب للتجميع المتعامد بتقسيم التردد OFDM في مرحلتي الإرسال والاستقبال، في القناة الطبيعية وتزويد الوصف لكل مرحلة من الخطوات المتضمنة. استخدام OFDM في البث المرئي الرقمي الأرضي DVB-T، قدم الكثير من التفسيرات التي تساهم في تزويد أفضل بكثير من أساسيات OFDM.

المراجع:

- [1] ETS 300744, -*Digital broadcasting systems for television, sound and data services, framing structure, channel coding, and modulation for digital terrestrial television.*, European Telecommunication standard, Doc. 300744, 1997.
- [2] NEE, R. V. and PRASAD, R. -*OFDM Wireless Multimedia Communications*, Norwood, MA: Artech House, 2000, 290.
- [3] BENOIT, H. -*Digital television* ,third edition, focal press is an imprint of Elsevier, USA, 2008, 304.
- [4] BINGHAM, J. A. C. -*Multi- carrier modulation for data transmission: An idea whose time has comm.*, IEEE Communications Magazine, vol.28, no.5,pp.5-14, May 1990.
- [5] OPPENHEIM, A. V. and SCHAFER, R. W. -*Discrete-Time Signal Processing*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989, 320.