مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (36) العدد (1) 2014
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (36) No. (1) 2014

تصميم مرشح رقمي توافقي باستخدام FPGA لضغط إشارة التعديل الترددي الخطي على خلفية الضجيج الأبيض الجامع

الدكتور مالك محمد [*]

الدكتور كمال أبو طبيخ [**]

(تاريخ الإيداع 11 / 11 / 2013. قُبِل للنشر في 26/ 2 / 2014)

□ ملخّص □

يتناول هذا المقال آلية ضغط إشارة LFM بشكل عملي على خلفية الضجيج الأبيض الجامع بواسطة مرشح رقمي توافقي DMF وفق خوارزمية الطي في المجال الزمني لإشارة الدخل و الإشارة المرجعية(نسخة الإشارة التي تمثل تابع الاستجابة النبضية للمرشح) باستخدام شريحة من نوع:

Cyclone II EP2C70F896C6 FPGA من شركة ALTERA المتوضعة على بورد التطوير والتعليم DE2-70 وذلك من أجل عدة قيم لنسبة مطال الإشارة إلى مطال الضجيج على دخل المرشح SNR_{INP} .

المرشح الرقمي التوافقي المصمم يحقق خوارزمية الطي الرقمي في المجال الزمني بين عينات إشارة الدخل و عينات الاستجابة النبضية للمرشح التي تمثل نسخة الإشارة المسجلة بشكل مناظر للإشارة المرسلة و ذلك في ذاكرة خاصة ،عملية تسجيل الإشارة المرسلة تتم مرة واحدة إذا كان قانون التعديل الترددي الخطي ثابتاً بينما تتم عملية التسجيل مع إرسال كل نبضة من نبضات الرادار إذا كان قانون التعديل متغيراً من نبضة إلى أخرى و ذلك بهدف زيادة ممانعة التشويش في حال تم اكتشاف قانون التعديل الثابت ، حيث تمثل هذه الخوارزمية عملية جمع للجداء الآني بين عينات إشارة الدخل و عينات الاستجابة النبضية للمرشح مع كل نبضة تقطيع لإشارة الدخل.

نتائج عمل المرشح تدرس باستخدام راسم إشارة رقمي لإشارة الدخل وإشارة الخرج من أجل عدة قيم لـ SNR_{INP}.

الكلمات المفتاحية: المرشحات التوافقية, التعديل الترددي الخطي.

[*] **مدرس – قسم الاتصالات والالكترونيات – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

[**] **أستاذ مساعد – قسم الاتصالات والالكترونيات – كلية الهندسة الالكترونية – أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية – حلب – سورية.**

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (36) العدد (1) 2014
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (36) No. (1) 2014

Using FPGA for Designing Digital Matched Filter by Pressing Linear Frequency Modulation (LFM) signal on Existing Additive White Gaussian Noise (AWGN)

Dr. malek Mohammed*
Dr. Kamal Abotabek**

(Received 11 / 11 / 2013. Accepted 26 / 2 / 2014)

□ ABSTRACT □

In this paper, we examine a practical method for pressing Linear Frequency Modulation (LFM) signal on existing Additive White Gaussian Noise (AWGN) by Digital Matched Filter (DMF), according to the Algorism of convolution in time for input signal and reference signal (version of signal) by using circuit FPGA type: Cyclone II EP2C70F896C6 from ALTERA company and putting on Development Education -II Board (DE2-70) for many deferent values of SNR on the input of digital filters**.** Deferent digital matched filter algorism digital convolution in time domain between input samples and impulse response samples in filters present a shift version of saved matched signal of send-signal, saving of send-signal one time if the law of liner modulation is constant, whereas it saves every sent pulse of radar pulses if the law of liner modulation is variable from one pulse to another, for increasing resistance to jamming when constant law of liner modulation is detected. For every sampling of input signal, this algorism presents the addition of the immediate multiplication between input samples and impulse response samples of filter. The results of filter processing use digital oscilloscope of input and output signals for many deferent values of SNR **.**

Keywords: Digital Matched Filter, Linear Frequency Modulation

* **Assistant Professor, Department of Communications and Electronic Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
** **Associate Professor, Department of Communications and Electronic Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Al-Assad Academy, Aleppo, Syria.**

مقدمة:

تستخدم عملية الترشيح الرقمي التوافقي Digital Matched Filtering بشكل واسع عند معالجة الإشارات في المستقبلات الرادارية الحديثة حيث يعتبر المرشح المحقق لخوارزمية الترشيح الرقمي التوافقي **العنصر الأساسي والأهم** في الرادار،هذا المرشح يحدد أهم المواصفات الأساسية للرادار: دقة القياس،قدرة التمييز،منطقة الكشف بالمدى،**ممانعة التشويش** وغيرها [1].

تصمم اليوم المرشحات الرقمية التوافقية و تقنيات الترشيح و التشكيل و التعديل و التشفير و غيرها من تقنيات المعالجة الرقمية على شرائح قابلة للبرمجة (FPGA) ، هذه الشرائح مكونة داخليا من بلوكات من الدوائر الالكترونية وكل بلوك يتكون من دوائر صغيرة موزعة على هيئة مجموعة من الخلايا المنطقية (Logic Cells) وتتكون كل خلية عادة من قلاب من نوع D (D-type Flip-Flop) والمكونة من بوابات منطقية مثل AND و XOR و OR.

إنّ شريحة الـ (FPGA) المستخدمة هي (EP2C70F896C6) وهي من عائلة (Cyclone II) من إنتاج شركة (ALTERA) [10] ومن أهم ميزاتها:

1) تحتوي على (70000) عنصرٍ منطقيٍ.
2) تملك (896) رجل توصيل طبقات عدَّة.
3) قابلة للبرمجة لأكثر من مرة (أكثر من ألف مرة) [10].
4) تردد العمل حتى 100MHz.

أهمية البحث وأهدافه:

تستخدم في الرادارات الحديثة الإشارات المعقدة البنية **ذات الطيف المنتشر** (إشارات LFM،إشارة التعديل الطوري ذي الترميز الثنائي BPCM وفق ترميز باركر،إشارة التعديل الطوري ذي الترميز الثنائي BPCM وفق سلاسل M وغيرها) وهي ذات قاعدة كبيرة $B = \tau_S . \Delta f >> 1$ مما يزيد مدى الكشف و قدرة التمييز **بالمدى و السرعة والأهم ممانعة التشويش.**

تستخدم اليوم خوارزميات معالجة رقمية مختلفة:خوارزمية الطي الرقمي في المجال الزمني، خوارزمية الطي الرقمي في المجال الترددي، خوارزمية FFT وغيرها.

تعتبر خوارزمية الطي الرقمي العقدي في المجال الزمني بين إشارة الدخل و الإشارة المرجعية من الخوارزميات السريعة والعملية و تعمل ضمن الزمن الحقيقي لذلك ستوضح لاحقا بعض العلاقات الرياضية الأساسية الخاصة بهذه الخوارزمية.

طرائق البحث ومواده:

1. مواد البحث

لتصميم واختبار مرشح DMF لإشارة LFM تم استخدام الأدوات والبرمجيات التالية:

1- حاسب PC.

بورد تطوير وتعليم DE2-70 [4] يحوي شريحة Cyclone II EP2C70F896C6 FPGA[10] يصمم عليها المرشح الرقمي التوافقي وفق المواصفات التالية: تردد التقطيع $50MHz$،عرض النبضة $6\mu sc$،عدد

العينات(طول الإشارة المرجعية) 300 ،قيمة الانحراف الترددي $10MHz$، عامل الضغط 60، نسبة مطال الإشارة إلى مطال الضجيج على دخل المرشح: $SNR_{INP} = 1/1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/8$ و عامل الربح بالمعالجة:

$$\frac{SNR_{OUT}}{SNR_{INP}}\{dB\} = 10\log 60 = 18dB.$$

2- راسم إشارة رقمي من نوع GDS-1152A.

3- بيئة التصميم Quartus II 6.0 في مرحلة المحاكاة و التصميم والتنفيذ.

4- لغة البرمجة VHDL [5].

2. خوارزمية الطي الرقمي العقدي في المجال الزمني تعطى وفق العلاقات الرياضية التالية:

يمكن تمثيل إشارة الدخل بالشكل العقدي بمركبتين متعامدتين (I, Q) وفق العلاقة الرياضية التالية[2]:

$$S(n) = S_I(n) + jS_Q(\mathrm{n}) \quad (1)$$

أما الإشارة المرجعية (نسخة الإشارة) فهي متناظرة زمنيا بالنسبة لإشارة الدخل و يمكن تمثيلها بالشكل العقدي أيضا بمركبتين متعامدتين (I, Q) وفق العلاقة الرياضية التالية [2]:

$$H(n) = H_I(n) - jH_Q(\mathrm{n}) \quad (2)$$

ويمكن تمثيل استجابة المرشح بالشكل العقدي وفق تابع الطي في المجال الزمني بالعلاقة الرياضية التالية [2]:

$$Y(n) = \sum_{m=0}^{M-1}\{S(n-m).H(n)\} = \sum_{m=0}^{M-1}\{S_I(n-m) + jS_Q(n-m)\}.\{H_I(n) - jH_Q(n)\} =$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1}\{S_I(n-m)H_I(n) + S_Q(n-m)H_Q(n)\} +$$

$$+ j\sum_{m=0}^{M-1}\{S_Q(n-m)H_I(n) - S_I(n-m)H_Q(n)\} = \quad (3)$$

$$= \mathrm{Re}\{Y(n)\} + \mathrm{Im}\{Y(n)\}$$

طويلة الاستجابة للمرشح الرقمي التوافقي تعطى وفق العلاقة التالية:

$$|Y(n)| = \sqrt{[\mathrm{Re}\{Y(n)\}]^2 + [\mathrm{Im}\{Y(n)\}]^2} \quad (4)$$

تعطى قيمة القسم الحقيقي $\mathrm{Re}\{Y(n)\}$ وفق العلاقة التالية:

$$\mathrm{Re}\{Y(n)\} = \sum_{m=0}^{M-1}\{H_I(m).S_I(n-m) + H_Q(m).S_Q(n-m)\} =$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1}H_I(m).S_I(n-m) + \sum_{m=0}^{M-1}H_Q(m).S_Q(n-m) = Y_{II}(n) + Y_{QQ}(n) \quad (5)$$

أما قيمة القسم التخيلي $\mathrm{Im}\{Y(n)\}$ فتعطى وفق العلاقة التالية:

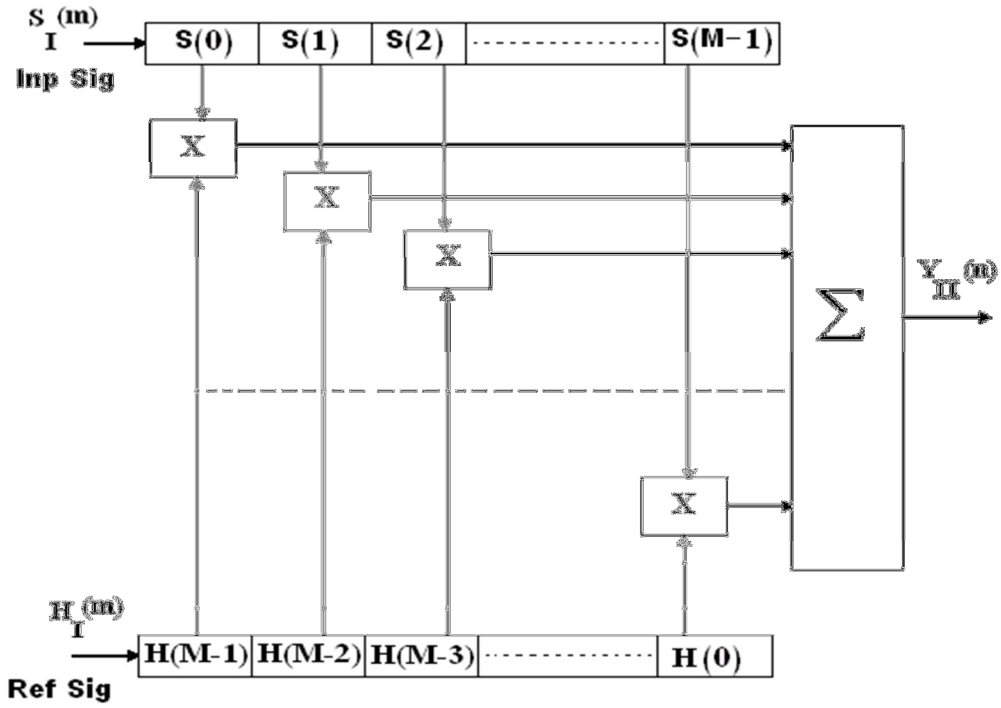
$$\mathrm{Im}\{Y(n)\} = \sum_{m=0}^{M-1} \{H_I(m).S_Q(n-m) - H_Q(m).S_I(n-m)\} =$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1} H_I(m).S_Q(n-m) - \sum_{m=0}^{M-1} H_Q(m).S_I(n-m) = Y_{IQ}(n) - Y_{QI}(n) \qquad (6)$$

حيث أن:

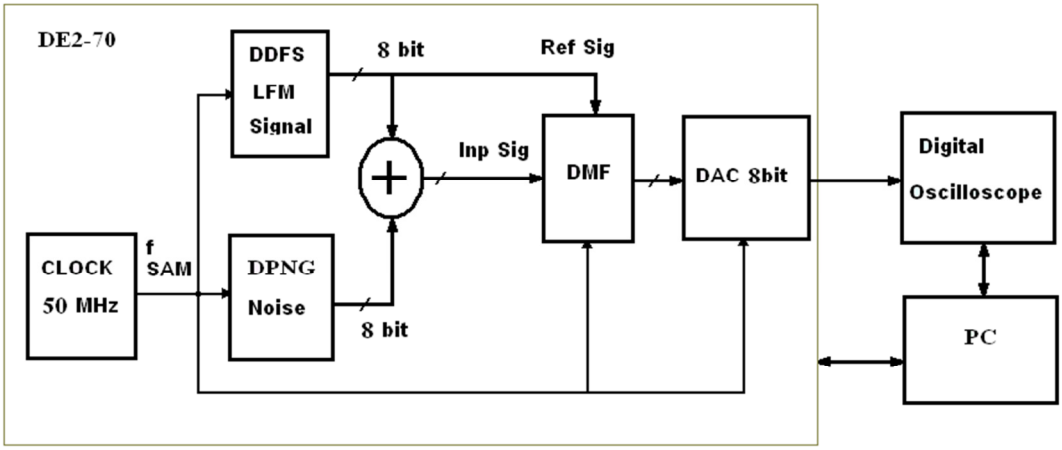
- $Y(n)$ الخرج العقدي لنتيجة الطي الزمني لإشارة الدخل والإشارة المرجعية.
- $|Y(n)|$ القيمة المطلقة (مودل) لنتيجة الطي الزمني لإشارة الدخل والإشارة المرجعية.
- $\mathrm{Re}\,Y(n)$ القسم الحقيقي لنتيجة الطي الزمني لإشارة الدخل والإشارة المرجعية.
- $\mathrm{Im}\,Y(n)$ القسم التخيلي لنتيجة الطي الزمني لإشارة الدخل والإشارة المرجعية.
- $S_I(n-m)$ عينات cos لإشارة الدخل.
- $S_Q(n-m)$ عينات sin لإشارة الدخل.
- $H_I(m)$ عينات cos للإشارة المرجعية.
- $H_Q(m)$ عينات sin للإشارة المرجعية.
- M عدد العينات (طول الإشارة المرجعية).

يبين الشكل (1) مخطط خوارزمية الطي $\{Y_{II}(n)\}$ لإشارة الدخل والإشارة المرجعية ذات عدد عينات (الطول) M، بنفس الطريقة يمكن إعطاء مخططات خوارزميات الطي الأخرى وحسابها $\{Y_{QQ}(n), Y_{IQ}(n), Y_{QI}(n)\}$ (نكتفي في هذه المقالة بتنفيذ خوارزمية طي واحدة).



الشكل رقم (1): خوارزمية الطي الزمني $\{Y_{II}(n)\}$ لإشارة الدخل والإشارة المرجعية بطول M.

يوضح الشكل (2) مخطط إجراء البحث والدراسة لمرشح DMF [3] من اجل خوارزمية التفاف واحدة {Y(n)} وهو مكون من مشكل تردد رقميDDFS لتشكيل إشارة LFM و مولد تتابع رقمي شبه عشوائي لإشارة الضجيج DPNG لتشكيل ضجيج أبيض وجامع و مرشح رقمي توافقي DMF بخوارزمية الطي الرقمي في المجال الزمني بعامل ضغط 60 ومحول DAC ذو 8bit وحاسب شخصي PC لربط DE2-70 عبر USB لحقن التصميم في شريحة FPGA [4] ذات الرقم Cyclone II EP2C70F896C6 و راسم إشارة رقمي GDS-1152A عبر USB لأخذ أشكال إشارات دخل و خرج مرشح DMF في المجال الزمني لحالات SNR_{INP} المختلفة،هذا البحث نفذ من اجل إشارة LFM و مرشح DMF ذات المواصفات المحددة أدناه.



الشكل رقم (2): مخطط إجراء البحث والدراسة لمرشحDMF.

النتائج والمناقشة

3-1. مواصفات إشارة LFM:

- المعالجة على التردد المتوسط IF : $f_{IF} = 6MHz$.
- نوع التعديل: LFM متزايد أو متناقص.
- قيمة الانحراف الترددي: $\Delta f = f_{IF} \pm 5 = 10MHz$.
- تردد التقطيع: $f_{SAM} = 50MHz, T_{SAM} = 0.02\mu sc$.
- عرض النبضة قبل الضغط: $\tau_S = 6\mu sc$.
- عدد العينات(طول الإشارة المرجعية): $M = \tau_S / T_{SAM} = 6/0.02 = 300$.
- عرض النبضة بعد الضغط: $\tau_{COM} = 1/\Delta f = 0.1\mu sc$ وهو مساوٍ لعرض المقطع الواحد: $\tau_{CH} = 0.1\mu sc$.
- دور النبضات: $T = 100\mu sc$.
- عدد المقاطع: $N = \tau_S / \tau_{CH} = 6/0.1 = 60$.
- خطوة التعديل الترددي: $\delta f = \Delta f / N = 10000/60 = 166.6KHz$.
- قاعدة الإشارة: $B = \Delta f . \tau_S = 10 * 6 = 60$.

- عامل الضغط: $K_{COM} = B = \tau_S / \tau_{COM} = 60$.
- نسبة: $SNR_{INP} = 1/1,1/2,1/3,1/4,1/5,1/8$.

3-2. مواصفات DMF.

- طول كلمة المعالجة لإشارة الدخل: 8bit تمثل أعدادا صحيحة.
- عدد الضوارب الرقمية المستخدمة: 300ضارب 9x9 bit.
- عدد مسجلات الإزاحة التفرعية ذات الطول 8bit : 2x300SR لحالة الشكل (3) و 3x300SR لحالة الشكل (4).
- جامع واحد بـ 300 دخل 16bit وخرج واحد ذو 27bit.
- عناصر عمليات رياضية و منطقية مختلفة (AND,NOT,XOR وأخرى).
- سعة ذاكرة RAM المستخدمة 10KB.
- درجة المرشح 300.
- سرعة تدفق معطيات الدخل (8bit كل 20nsc):

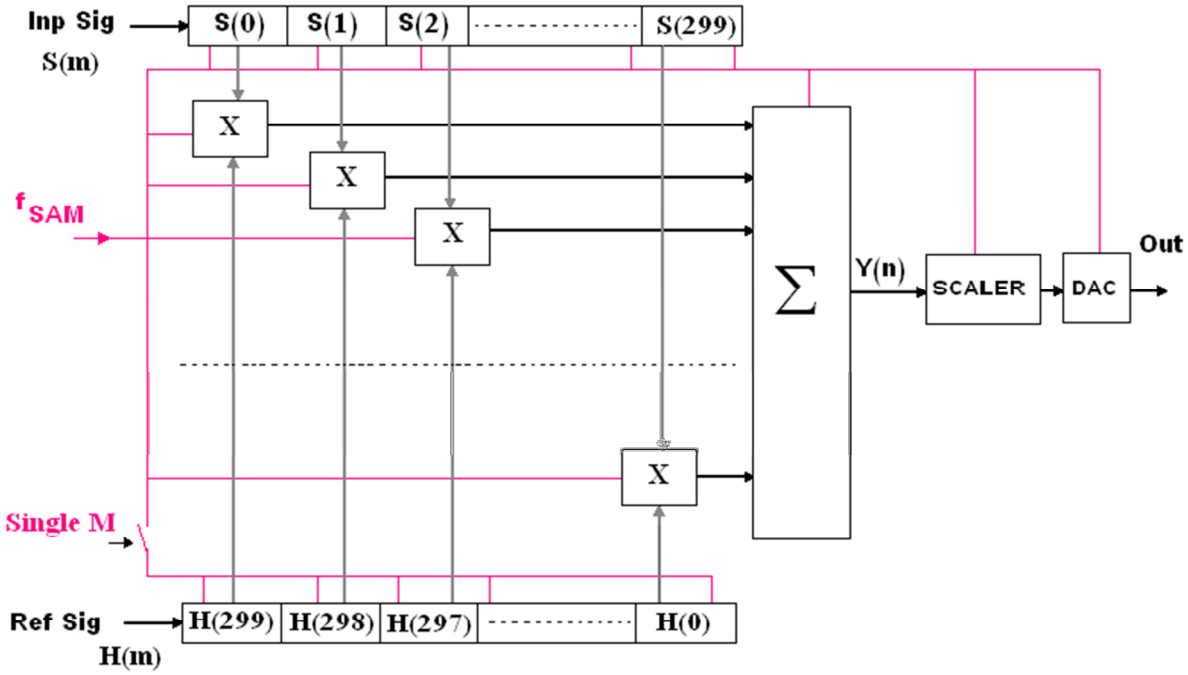
8x50x1000000/(8x1024x1024)=48 MBPRS.

- توليف آني ومتزامن لخوارزمية المعالجة حسب قانون التعديل مع كل نبضة للإشارة المرجعية .
- سرعة المعالجة 300 عملية ضرب و جمع وعمليات إزاحة وتحويل وأخرى خلال زمن 20nsc وهذا يساوي 15 مليار عملية رياضية (ضرب و جمع)خلال ثانية وذلك من خلال استخدام مبدأ المعالجة المتوازية(ضرب وجمع لـ 300عينة رقمية بطول 8bit وإزاحة و نقل وتقسيم وعمليات أخرى بآن واحد خلال دور واحد لنبضات التقطيع 20nsc) وهذا يعادل تردد نبضات ساعة للمعالج 15.0GHz لذلك تكون عملية المعالجة خلال الزمن الحقيقي ON-LINE.
- عامل ربح المعالجة التوافقية:

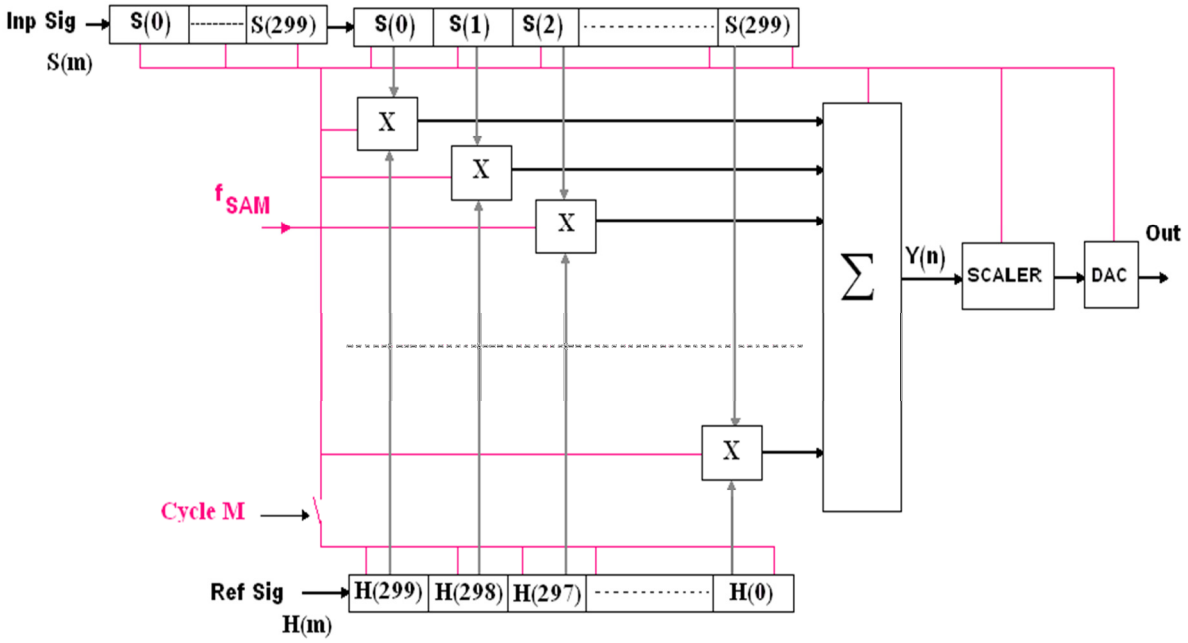
$$K_{MF} = SNR_{OUT} / SNR_{INP} = B \Rightarrow K_{MF}(dB) = 10\log B = 10\log 60 = 18dB$$

خوارزمية الطي الرقمي مبينة على الشكل (3) بعدد عينات (طول)للإشارة المرجعية M=300 لحالة إشارة ثابتة البارامترات(التردد و قانون التعديل) بحيث يتم تسجيل قيم عينات الإشارة المرجعية مرة واحدة في مسجلات الإزاحة H(0)…H(299) خلال زمن عرض النبضة بواسطة إشارة Single M وعلى الشكل (4) لحالة إشارة متغيرة البارامترات من نبضة إلى نبضة (التردد و قانون التعديل) بحيث يتم تسجيل قيم عينات الإشارة المرجعية في مسجلات الإزاحة H(0)…H(299) خلال زمن عرض النبضة مع كل دور للإشارة بواسطة إشارة Cycle M،هنا تؤخر عينات إشارة الدخل بمقدار عرض النبضة لضرورة تسجيل عينات الإشارة المرجعية بشكل متناظر مع إشارة الدخل وبعدها يحسب الطي الزمني بين الإشارتين مع كل نبضة تقطيع.

-إمكانية تطوير الخوارزمية من خلال الربط التسلسلي لعدة خوارزميات بالدخل والخرج للحصول على قاعدة إشارة أكبر وعامل ربح بالمعالجة حتى 36dB.



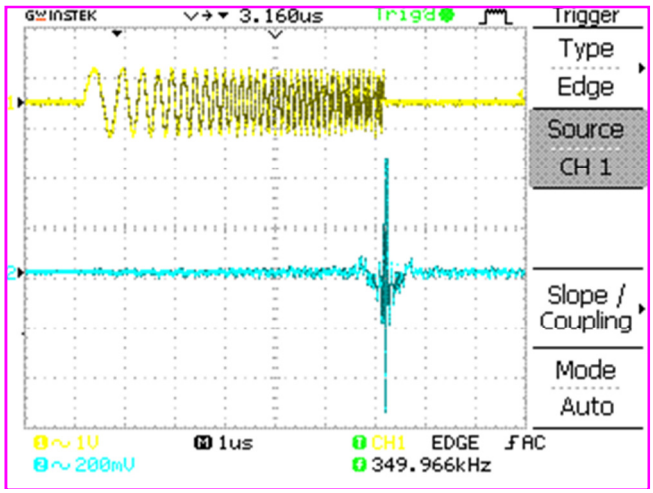
الشكل رقم (3): خوارزمية الطي الرقمي في المجال الزمني للمرشح DMF ذات الطول M=300 لحالة إشارة ثابتة البارامترات



الشكل رقم (4): خوارزمية الطي الرقمي في المجال الزمني للمرشح DMF ذات الطول M=300 لحالة إشارة متغيرة البارامترات من نبضة إلى نبضة

3-3. النتائج العملية.

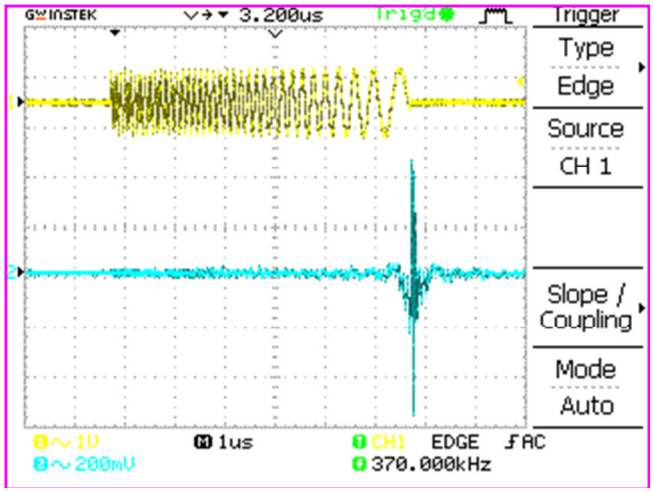
نتائج التصميم العملي للمرشح في المجال الزمني لإشارة الدخل وإشارة الخرج باستخدام راسم إشارة رقمي من نوع GDS-1152A مبينة على الشكل (5) بدون تأثير الضجيج لحالة تعديل ترددي خطي وفق قانون متزايد حيث نلاحظ عملية ضغط إشارة الخرج و أن مطالها يملك قيمة عظمي .



الشكل رقم (5): إشارة الدخل والخرج لمرشح DMF لحالة بدون ضجيج وقانون تعديل متزايد

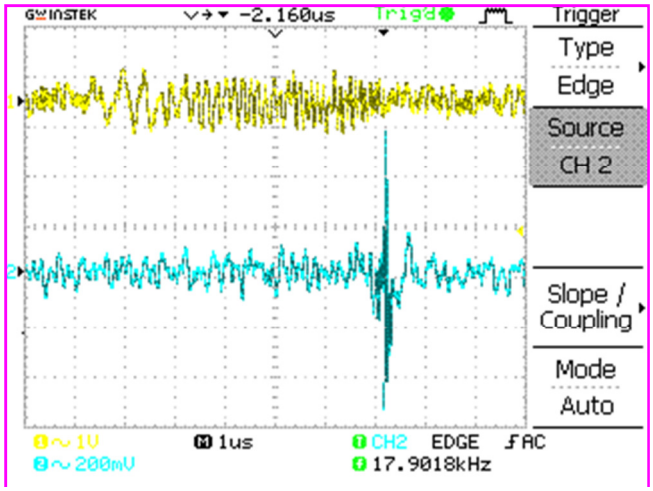
على الشكل (6) مبين إشارة الدخل و إشارة الخرج للمرشح بدون تأثير الضجيج لحالة تعديل ترددي خطي وفق قانون متناقص حيث نلاحظ عملية ضغط إشارة الخرج و أن مطالها يملك قيمة عظمي كما في الحالة السابقة .

.



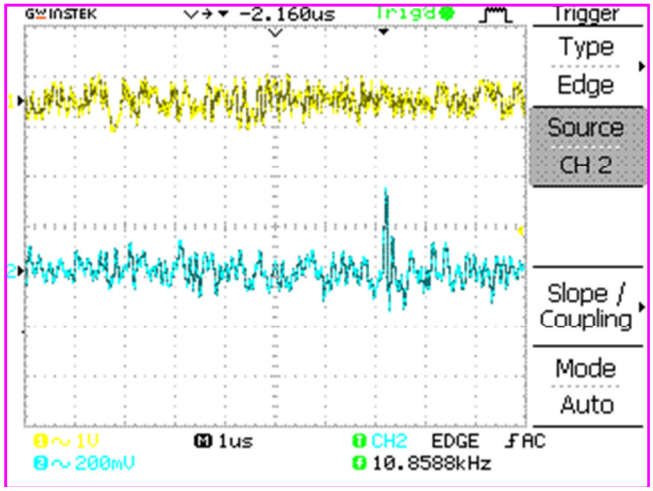
الشكل رقم (6): إشارة الدخل والخرج لمرشح DMF لحالة بدون ضجيج وقانون تعديل متناقص

على الشكل (7) مبين إشارة الدخل و إشارة الخرج للمرشح مع تأثير الضجيج بعامل $SNR_{INP} = 1/1$ لحالة تعديل ترددي خطي وفق قانون متزايد حيث نلاحظ عملية ضغط إشارة الخرج مع انخفاض مطالها مع تأثير الضجيج .



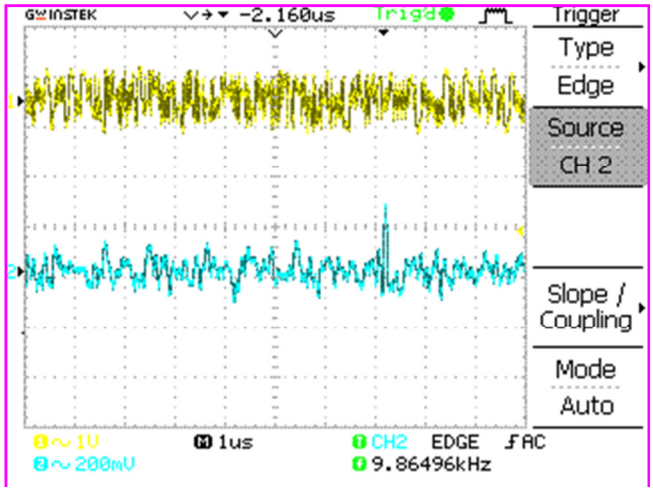
الشكل رقم(7): إشارة الدخل والخرج لمرشح DMF لحالة $SNR_{INP}=1/1$

على الشكل (8) مبين إشارة الدخل و إشارة الخرج للمرشح مع تأثير الضجيج بعامل $SNR_{INP}=1/2$ لحالة تعديل ترددي خطي وفق قانون متزايد حيث نلاحظ عملية ضغط إشارة الخرج مع انخفاض مطالها مع تأثير الضجيج مقارنة مع الحالة السابقة.



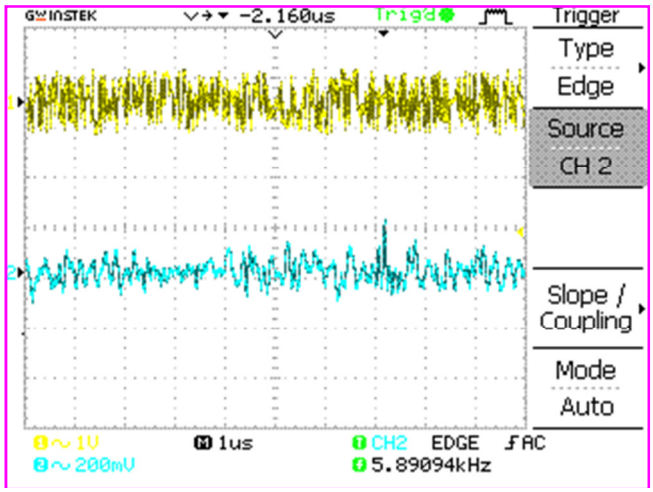
الشكل رقم (8): إشارة الدخل والخرج لمرشح DMF لحالة $SNR_{INP}=1/2$

على الشكل (8) مبين إشارة الدخل و إشارة الخرج للمرشح مع تأثير الضجيج بعامل $SNR_{INP}=1/3$ لحالة تعديل ترددي خطي وفق قانون متزايد حيث نلاحظ عملية ضغط إشارة الخرج مع انخفاض مطالها مع تأثير الضجيج مقارنة مع الحالة السابقة.



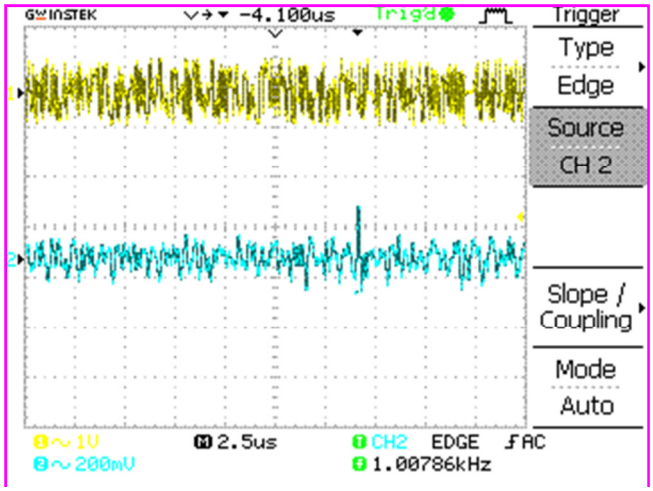
الشكل رقم (9) إشارة الدخل والخرج لمرشح DMF لحالة $SNR_{INP}=1/3$

على الشكل (10) مبين إشارة الدخل و إشارة الخرج للمرشح مع تأثير الضجيج بعامل $SNR_{INP}=1/4$ لحالة تعديل ترددي خطي وفق قانون متزايد حيث نلاحظ عملية ضغط إشارة الخرج مع انخفاض مطالها مع تأثير الضجيج مقارنة مع الحالة السابقة.



الشكل رقم (10): إشارة الدخل والخرج لمرشح DMF لحالة $SNR_{INP}=1/4$

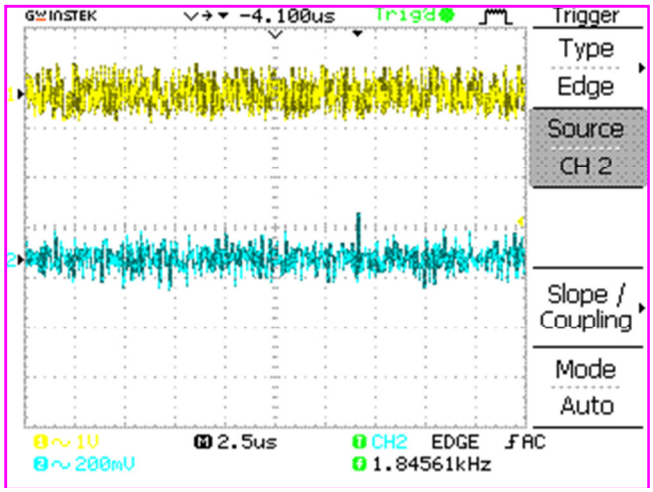
على الشكل (11) مبين إشارة الدخل و إشارة الخرج للمرشح مع تأثير الضجيج بعامل $SNR_{INP}=1/5$ لحالة تعديل ترددي خطي وفق قانون متزايد حيث نلاحظ عملية ضغط إشارة الخرج مع انخفاض مطالها مع تأثير الضجيج مقارنة مع الحالة السابقة.



الشكل رقم (11): إشارة الدخل والخرج لمرشح DMF لحالة $SNR_{INP}=1/5$.

على الشكل (12) مبين إشارة الدخل و إشارة الخرج للمرشح مع تأثير الضجيج بعامل $SNR_{INP}=1/8$ لحالة تعديل ترددي خطي وفق قانون متزايد حيث نلاحظ عملية ضغط إشارة الخرج مع انخفاض مطالها مع تأثير الضجيج مقارنة مع الحالة السابقة.

.



الشكل رقم (12): إشارة الدخل والخرج لمرشح DMF لحالة $SNR_{INP}=1/8$

الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال النتائج العملية المبينة على الأشكال السابقة (5....12) نلاحظ تحقيق عملية ضغط الإشارة على خرج المرشح و هذا ما يحققه المرشح الرقمي التوافقي المخصص لمعالجة إشارة LFM من خلال خوارزمية الطي الرقمي بين عينات إشارة الدخل و عينات الإشارة المرجعية (نسخة الإشارة) و كذلك نلاحظ انخفاض مطال إشارة الخرج مع انخفاض SNR_{INP} و لكن تبقى إمكانية استقبال و معالجة الإشارة لحالات SNR=1/8<<1 و ذلك عندما تكون الإشارة على دخل المرشح غير ملحوظة نهائيا بينما على خرج المرشح تكون الإشارة واضحة جدا حتى من أجل

SNR=1/8 وذلك بسبب عملية الترشيح التوافقي الذي يحقق عامل ربح معالجة توافقية يتناسب طردا مع قاعدة الإشارة $K_{MF}(dB)=10\log B$ ، بزيادة قاعدة الإشارة $B=\Delta f.\tau_S$ إما من خلال زيادة الانحراف الترددي (Δf) أو زيادة عرض النبضة (τ_S) يمكن زيادة عامل ربح المعالجة التوافقية واستخلاص الإشارة في ظروف أسوء من SNR<1/8، كما تتم زيادة ممانعة التشويش من خلال استخدام قانون تعديل ترددي خطي متغير من نبضة إلى أخرى.

المراجع:

1-И.Корнеев, к.т.н., А. Гришин ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 2/2008.

2-КУЗЬМИН С. З. Цифровая радиолокация.Введение в теорию. Издательство 1Щ, 2000 - 428 с.

3- Introduction to matched filters John C. Bancroft CREWES Research Report . Volume 14 (2002).

4-COFFMAN K., 2000- Real World FPGA Design With Verilog. Prentice Hall, USA, 290.

5- Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q.

6- Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, 1998: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 454, 903-995.

7- GOLDBERG B., 1999- Digital Frequency Synthesis Demystified, LLH Technology Publishing, united states, 334.

8-www.chip-news.ru

9- www.radio.ru

10-www.altera.com.