تحسين أداء حاذف الصدى المتكيف في أنظمة الاتصالات الهاتفية باستخدام خوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري المنسوب المعاودة

غدير إبراهيم*،محمود أشقر، مدين خضر****

*طالب دراسات عليا(ماجستير)، كلية الهندسة الإلكترونية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية

**كلية الهندسة الإلكترونية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية

الملخص

إن الهدف الرئيسي من هذه المقالة هو تحسين أداء حاذف الصدى المتكيف في أنظمة الاتصالات الهاتفية. تم في هذا البحث تقديم مقترح لحاذف الصدى المتكيف باستخدام مرشح رقمي وباستجابة نبضية منتهية Finite Impulse Response (FIR) وبثلاث خوارزميات تكيف مختلفة. تم نمذجة مسار الصدى باستخدام مرشح رقمي باستجابة نبضية غير منتهية Infinite Impulse Response (IIR)، وتم اقتراح معيار معامل حذف الصدى لتقييم جودة أداء النموذج المقترح. تم إجراء اختبار ومحاكاة على الحاسب ضمن برنامج الـ (Matlab) للنموذج المقترح باستخدام كل من خوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري Least Mean Square (LMS) وخوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري المنسوب (الطبيعي) Normalized LMS (NLMS)، وكذلك خوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري المنسوب (الطبيعي) المعاودة Recursive NLMS (RNLMS)، وإجراء مقارنة بينها، وإيضاح النتائج من خلال الرسومات والأشكال اللازمة. تم التوصل إلى أنّ استخدام خوارزمية التكيف RNLMS في النموذج المقترح نجحت في حذف إشارات الصدى بشكل كبير.

الكلمات المفتاحية: الصدى، الصدى الصوتي، الصدى المهجن، المرشح المتكيف، خوارزمية التكيف (LMS)، خوارزمية التكيف (NLMS)، خوارزمية التكيف (RNLMS)، كاشف الكلام المزدوج.

ورد البحث للمجلة بتاريخ 20/ 7/ 2020

قُبل للنشر بتاريخ 5/ 1/ 2021

Improvement of Adaptive Echo Cancellation Performance in Telephony Systems Using Recursive Normalized Least Mean Square (RNLMS) Algorithm

Ghadeer Ibrahim*, Mahmood Ashkar, Median Kheder****

*Postgraduate Student (MSc), Faculty of Electronic Engineering, Alassad Academy for Military Engineering

**Faculty of Electronic Engineering, Alassad Academy for Military Engineering

Abstract

The main objective of this article is to improve the performance of the adaptive echo cancellation in telephony systems. A proposal of an adaptive echo cancellation has been implemented using a Finite Impulse Response (FIR) adaptive digital filter with three different adaptive algorithms. The modeling of the echo path has been presented using an Infinite Impulse Response (IIR) digital filter, and the Echo Cancelation Coefficient Criteria (ECCC) have been proposed to assess the quality of performance of the proposed model.

Computer simulation and testing using Matlab software environment of the proposed model have been conducted using each of the LMS, NLMS, and RNLMS Algorithms, and a comparison between each of these three algorithms has been made to improve the performance of an adaptive echo canceller. The results of this comparison have been clarified through necessary graphics and figures. It has been found that the RNLMS proposed algorithm for an adaptive echo cancellation has succeeded to cancel the echo signals with high performance.

Keywords: Echo, Acoustic Echo, Hybrid Echo, adaptive filters, LMS Algorithm, NLMS Algorithm, RNLMS Algorithm, and Double Talk Detector.

Received 20 /7/ 2020.
Accepted 5/1 / 2021

1- مقدمة:

تعتبر عملية معالجة مشكلة الصدى في أنظمة الاتصالات الهاتفية على درجة من الأهمية، حيث تؤثر إشارات الصدى سلباً على جودة الاتصال. تعتبر تقنية حذف إشارات الصدى باستخدام المرشحات الرقمية المتكيفة من أهم التقنيات التي يتم العمل على تطويرها وبشكل مستمر. يناقش هذا البحث بعض خوارزميات التكيف المستخدمة في حواذف الصدى المتكيفة، وتقديم خوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري المنسوب المعاودة Recursive Normalized Least Mean Square (RNLMS)، كمقترح لتحسين أداء حاذف الصدى المتكيف، وكذلك تقديم معيار معامل حذف الصدى Echo Cancelation Coefficient Criteria (ECCC) كمقترح لتقييم أداء حاذف الصدى في معالجة ظاهرة (مشكلة) الصدى.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تعتبر زيادة فعّالية أداء حواذف الصدى في أنظمة الاتصالات الهاتفية أمراً بالغ الأهمية، وذلك بغرض الحفاظ على جودة الاتصال في مختلف أنظمة الاتصالات الحديثة، وكذلك تحقيق المتطلبات الإضافية المفروضة على أداء هذه الحواذف من قبل مشغلي شبكات الاتصال السلكية واللاسلكية. لذلك يعمد الباحثون إلى تطوير وزيادة فعالية أداء حواذف الصدى المتكيفة بشكل مستمر بغية الحصول على أداء أفضلي في التخلص من الصدى وذلك انطلاقاً من أهمية تحقيق المتطلبات الأساسية لمعايير جودة الاتصال، وبالتالي يهدف هذا البحث إلى تحسين أداء حاذف الصدى المتكيف في أنظمة الاتصالات الهاتفية بالاعتماد على خوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري المنسوب المعاودة Recursive Normalized Least Mean Square (RNLMS)، وتحقيق ذلك برمجياً.

3- طريقة البحث:

شملت طريقة البحث النقاط الأساسية التالية:

1. استعراض مشكلة الصدى في أنظمة الاتصالات الهاتفية؛
2. نمذجة رياضية لحاذف الصدى المتكيف مع كاشف الكلام المزدوج ؛

3. نمذجة برمجية لحاذف الصدى باستخدام البيئة البرمجية (Matlab R2014a) ؛
4. استعراض النتائج.

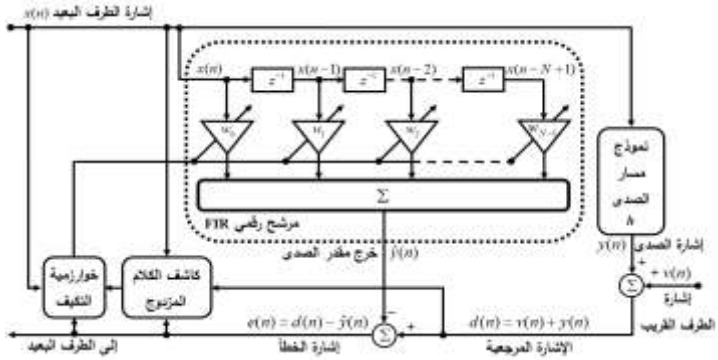
4- مشكلة الصدى في أنظمة الاتصالات الهاتفية:

يمكن أن تحدث (تظهر) مشكلة الصدى في جميع أنظمة الاتصال الحديثة، وهي عبارة عن ظاهرة تنعكس فيها نسخة مؤخرة ومشوهة من الصوت الأصلي أو الإشارة الكهربائية مرة أخرى إلى المصدر [1].

تعتمد الحلول العامّة لمعالجة مشكلة الصدى على عملية الترشيح الرقمي المتكيف، حيث تستخدم معظم حواذف الصدى المتكيفة خوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري Least Mean Square (LMS) للدكتور Widrow من أجل تحسين جودة المحادثة الهاتفية. هناك العديد من الخوارزميات للمرشحات الرقمية المتكيفة، والمشتقة من خوارزمية LMS التقليدية، مثل خوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري المنسوب (الطبيعي) Normalized Least Mean Square (NLMS)، وخوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري المنسوب (الطبيعي) المعاودة Recursive Normalized Least Mean Square (RNLMS)، إن الهدف من الخوارزميات البديلة المستندة إلى LMS، هو تقليل (تبسيط) التعقيد الحسابي وتحسين زمن التقارب [1].

5- حاذف الصدى المتكيف مع كاشف الكلام المزدوج:

يستخدم حاذف الصدى المتكيف في مجالات الاتصال المختلفة لحذف الصدى السمعي Acoustic Echo، وكذلك لحذف صدى المهجن Hybrid Echo. يوضح الشكل (1) مخططاً صندوقياً لحاذف الصدى المتكيف مع كاشف الكلام المزدوج، حيث تؤخذ نسخة من إشارة الطرف البعيد $\boldsymbol{x}(n)$ إلى المرشح المتكيف الذي يُجري عليها عملية التفاف مع معاملاته الوزنية $\boldsymbol{w}(n)$ وتكون الإشارة على خرج المرشح الرقمي المتكيف عبارة عن إشارة الصدى المقدّرة $\hat{y}(n)$ [3][2].



الشكل (1) المخطط الصندوقي لحاذف الصدى المتكيف مع كاشف الكلام المزدوج

– يُعطى شعاع إشارة دخل حاذف الصدى المتكيف $\boldsymbol{x}(n)$ بالعلاقة:

$$\boldsymbol{x}(n)=[x(n),x(n-1),....,\quad x(n-N+1)]^T \tag{1}$$

حيث أن N : درجة المرشح الرقمي المتكيف (FIR).

– يُعطى شعاع المعاملات الوزنية $\boldsymbol{w}(n)$ بالعلاقة:

$$\boldsymbol{w}(n)=[w_0(n),w_1(n),....,\quad w_{N-1}(n)]^T \tag{2}$$

– تُعطى إشارة خرج مقدّر الصدى $\hat{y}(n)$ بالعلاقة:

$$\hat{y}(n)=\sum_{i=0}^{N-1}w_i(n)x(n-i) \tag{3}$$

– يمكن التعبير عن إشارة خرج مقدّر الصدى $\hat{y}(n)$ بالصيغة الشعاعية بالعلاقة:

$$\hat{y}(n)=\boldsymbol{x}^T(n)\boldsymbol{w}(n)=\boldsymbol{w}^T(n)\boldsymbol{x}(n) \tag{4}$$

– يمكن صياغة الإشارة المرجعية $d(n)$ بالعلاقة:

$$d(n)=v(n)+y(n) \tag{5}$$

– تُعطى إشارة الخطأ $e(n)$ بالعلاقة:

$$\begin{aligned} e(n)&=d(n)-\hat{y}(n)\\ &=v(n)+y(n)-\hat{y}(n)\end{aligned} \tag{6}$$

بملاحظة العلاقة (6)، نجد أنه عندما يكون أداء حاذف الصدى مثالياً، فإن الإشارة المقدّرة $\hat{y}(n)$ على خرج مقدّر الصدى، ستكون مساوية لإشارة الصدى $y(n)$، وبالتالي فإن قيمة المقدار $\hat{y}(n)-y(n)$ ستساوي الصفر، ومنه فإن إشارة الخطأ

$e(n)$ في هذه الحالة ستكون عبارة عن إشارة الطرف القريب $v(n)$، أي $e(n) = v(n)$ عندما $\hat{y}(n) = y(n)$ [2][3].

5-1- خوارزميات المرشح المتكيف:

يتطلب المرشح المتكيف تحديثًا ذاتياً وتكيفياً للمعاملات الوزنية، يتم ذلك باستخدام إحدى خوارزميات التكيف.

5-1-1- خوارزمية LMS :

تعتبر هذه الخوارزمية واحدة من أفضل خوارزميات الترشيح المتكيف. حيث تقوم بضبط ومعايرة معاملات المرشح $\boldsymbol{w}(n)$، من أجل تقليل متوسط مربع الخطأ. تُعطى معادلة التحديث بالعلاقة التالية:

$$\boldsymbol{w}(n+1) = \boldsymbol{w}(n) + 2\mu\, e(n)\, \boldsymbol{x}(n) \qquad (7)$$

$\boldsymbol{w}(n)$: شعاع المعاملات الوزنية السابق، و μ: معامل ضبط الخوارزمية (حجم الخطوة) ويحدد معدل التقارب، و $\boldsymbol{x}(n)$: شعاع إشارة الدخل، و $e(n)$: إشارة الخطأ [4][5][6].

5-1-2- خوارزمية NLMS :

تستخدم خوارزمية NLMS عامل تقارب متغير $\mu(n)$ يقلل من الخطأ اللحظي، وذلك من أجل تحسين معدّل التقارب من الحل الأفضلي لوينر. يمكن التعبير عن صيغة تحديث المعاملات الوزنية في هذه الخوارزمية كمايلي:

$$\boldsymbol{w}(n+1) = \boldsymbol{w}(n) + \mu(n)\, e(n)\, \boldsymbol{x}(n) \qquad (8)$$

حيث أن $\mu(n)$ مقدار الخطوة المتغير مع الزمن ويُعطى بالعلاقة:

$$\mu(n) = \frac{\zeta}{\boldsymbol{x}^T(n)\boldsymbol{x}(n)} \qquad (9)$$

حيث أن ζ هي مقدار خطوة التسوية $(0 < \zeta < 2)$ Normalized Step Size.

نلاحظ من العلاقة (9) أن مقدار الخطوة $\mu(n)$ متعلق بطاقة إشارة الدخل $\boldsymbol{x}^T(n)\boldsymbol{x}(n)$. بتعويض العلاقة (9) في العلاقة (8)، نحصل على معادلة تحديث المعاملات الوزنية لخوارزمية NLMS كما يلي:

$$\boldsymbol{w}(n+1)=\boldsymbol{w}(n)+\frac{\zeta}{\delta+\boldsymbol{x}^T(n)\boldsymbol{x}(n)}e(n)\ \boldsymbol{x}(n) \tag{10}$$

تم إضافة ثابت δ كعامل أمان Safety Factor وهو ثابت صغير موجب، وذلك لتجنب مشكلة حساب معادلة تحديث شعاع المعاملات الوزنية عندما تكون طاقة إشارة الدخل صغيرة جداً (أو صفرية)، وبذلك نحصل على صيغة عملية لمعادلة تحديث المعاملات الوزنية [6][5][2].

5-1-3- خوارزمية RNLMS:

يمكن تحقيق وبناء خوارزمية NLMS فعليّاً بنمط من النوع المعاود، حيث يمكن تحديث معيار التربيع $\boldsymbol{x}^T(n)\boldsymbol{x}(n)$ في كل خطوة عن طريق إجراء الضرب المناسب أو إجراؤها بشكل تكراري. في الواقع، إذا كانت $\sigma_{xx}^2(n)$ هي تشتت إشارة الدخل $\boldsymbol{x}(n)$ ، فيمكننا إجراء هذا التحديث المرجح بشكل تكراري كما يلي:

$$\hat{\sigma}_{xx}^2(n)=\gamma\,\hat{\sigma}_{xx}^2(n-1)+(1-\gamma)\,x^2(n) \tag{11}$$

حيث أن $\hat{\sigma}_{xx}^2(n)$ تقييم تشتت إشارة الدخل $x(n)$ ، و γ عامل النسيان Forgetting Factor ويساوي (0.8). تُعطى معادلة تحديث مقدار الخطوة $\mu_R(n)$ في هذه الخوارزمية كمايلي:

$$\mu_R(n)=\frac{\alpha}{\hat{\sigma}_{xx}^2(n)+\beta} \tag{12}$$

حيث أن α مقدار صغير موجب ويساوي (0.1)، و β مقدار صغير جداً موجب ويساوي (10^{-4}). باستخدام مقدار الخطوة من العلاقة (12)، نحصل على معادلة تحديث المعاملات الوزنية لخوارزمية RNLMS كما يلي [7]:

$$\boldsymbol{w}(n+1)=\boldsymbol{w}(n)+\frac{\alpha}{\hat{\sigma}_{xx}^2(n)+\beta}e(n)\ \boldsymbol{x}(n) \tag{13}$$

5-2- كاشف الكلام المزدوج Double Talk Detector (DTD):

من الخصائص المهمة لحاذف الصدى هو أداؤه الجيد أثناء الكلام المزدوج، لذلك من المهم أن يكون هناك كاشف كلام مزدوج موثوق، حيث يتمثل دور هذه الوظيفة المهمة في تجميد تكييف المرشح $\boldsymbol{w}$ ، عندما يكون كلام الطرف القريب v موجودًا لتجنب انحراف الخوارزمية المتكيفة، ولهذا الغرض تم اقتراح طريقة الترابط

المتبادل المعيارية Normalized Cross-Correlation (NCC) كطريقة فعّالة في عمليات إلغاء الصدى، تقوم خوارزمية (NCC) بحساب القرار الإحصائي وفقًا للعلاقة بين الإشارة المرجعية وإشارة الخطأ، تعلن خوارزمية NCC عن وجود كلام قريب عندما يحقق القرار الإحصائي المعياري العلاقة التالية:

$$\xi_{NCC} = 1 - \frac{r_{ed}}{\sigma_d^2} < T \tag{14}$$

حيث r_{ed} الترابط المتبادل بين إشارة الخطأ $e(n)$ والإشارة المرجعية $d(n)$، و σ_d^2 تشتت الإشارة المرجعية. إن القيمتان r_{ed} و σ_d^2 غير متوفرتان عملياً ، لذلك نعرف القرار الإحصائي المقدر الجديد كمايلي:

$$\xi_{NCC} = 1 - \frac{\hat{r}_{ed}}{\hat{\sigma}_d^2} < T \tag{15}$$

حيث: $\hat{r}_{ed}$ هو تقدير r_{ed}، و $\hat{\sigma}_d^2$ هو تقدير σ_d^2.

يمكننا إيجاد هذه التقديرات باستخدام خوارزمية الترجيح الأسي التكرارية:

$$\hat{r}_{ed}(n) = \lambda \hat{r}_{ed}(n-1) + (1-\lambda) e(n) d^T(n) \tag{16}$$

$$\hat{\sigma}_d^2(n) = \lambda \hat{\sigma}_d^2(n-1) + (1-\lambda) d(n) d^T(n) \tag{17}$$

حيث $e(n)$ عينة من إشارة الخطأ مأخوذة في اللحظة n، و $d(n)$ عينة من الإشارة المرجعية مأخوذة في اللحظة n، و λ معامل الترجيح الأسي $(\lambda \cong 1)$ [8][3][2].

3-5- تقييم أداء حاذف الصدى المتكيف:

يتم اعتماد معايير معينة نستطيع من خلالها الحكم على عمل حاذف الصدى المتكيف فيما إذا كان أداؤه جيداً أم لا، ومن هذه المعايير نورد ما يلي:

1- تحسين ضياع الصدى الراجع Echo Return Loss Enhancement (ERLE).

2- مقترح معيار معامل حذف الصدى Echo Cancellation Coefficient Criteria (ECCC).

5-3-1- تحسين ضياع الصدى الراجع ERLE [10][9]:

يعرّف مقياس ERLE بأنه نسبة الاستطاعة اللحظية للإشارة $d(n)$ إلى الاستطاعة اللحظية لإشارة الخطأ $e(n)$، حيث يقيس ERLE مقدار الضياع الناتج عن المرشح المتكيف وحده. رياضياً، يمكن التعبير عن ذلك كمايلي:

$$ERLE = 10\log\frac{p_d(n)}{p_e(n)} = 10\log\frac{E[d^2(n)]}{E[e^2(n)]} \qquad (18)$$

يعتبر أداء حاذف الصدى أمثلي عندما يكون ERLE في حدود (30dB-40dB).

5-3-2- مقترح معيار معامل حذف الصدى ECCC:

تم اقتراح هذا المعيار لبساطته ووضوحه في التعبير عن أداء حاذف الصدى، وذلك استناداً إلى أن إشارة الخطأ $e(n)$ مكونة من إشارة الطرف القريب $v(n)$ وإشارة الصدى المتبقي $\hat{y}(n) - y(n)$ ، فإذا قمنا بطرح استطاعة إشارة الطرف القريب $v(n)$، من استطاعة إشارة الخطأ $e(n)$، فمن المفترض أن يتبقى لدينا استطاعة صفرية تقريباً لإشارة الصدى المتبقي $\hat{y}(n) - y(n) \approx 0$ ، وذلك في حال كان أداء حاذف الصدى أمثلياً. يمكن التعبير عن ذلك رياضياً كمايلي:

$$ECCC = \left[P_e(n) - P_v(n)\right] \qquad (19)$$

حيث أن $P_e(n)$ الاستطاعة اللحظية لإشارة الخطأ، و $P_v(n)$ الاستطاعة اللحظية لإشارة الطرف القريب.

6- النمذجة الحاسوبية لحاذف الصدى باستخدام الـ (Matlab):

تم في النمذجة (المحاكاة) الحاسوبية [11][10][3]:

- تسجيل أصوات تمثل كل من إشارة الطرف البعيد وإشارة الطرف القريب، حيث تم مراعاة توفر أربع حالات أثناء تسجيل الإشارات الصوتية:
  - يتحدث الطرف البعيد فقط لمدة (5sec)؛
  - يتحدث كلا الطرفان معاً (كلام مزدوج) لمدة (5sec)؛
  - يتحدث الطرف القريب فقط لمدة (5sec)؛
  - كل من الطرفين صامت لمدة (5sec).

لقد تم تسجيل الإشارات الصوتية عن طريق برنامج تسجيل صوتي بصيغة ملفات امتدادها (wav)، ومن ثم تم حفظها في مسار برنامج الـ (Matlab) ليتم استخدامها من أجل تنفيذ المحاكاة.

– تم نمذجة مسار الصدى برمجياً باستخدام البيئة البرمجية (Matlab)، حيث تم استخدام نظام (مرشح) تمرير حزمة (Band Pass Filter) ذي استجابة نبضية غير منتهية (IIR)، ومن أجل تصميم هذا المرشح بشكل يتناسب مع تمثيل مسار الصدى، تم اختيار المرشح من النمط Chebyshev Type – II, Band Pass Filter، لأنه يتميز بانتقائية عالية، بالإضافة إلى أن الاستجابة الترددية في مجال التمرير مستوية (Flat) إلى أقصى حد، وقد تم اختيار القيم التصميمية التالية:

1– تردد مجال التمرير w_p : $w_p = [0.1 \quad 0.625]\pi\, rad/sample$

2– تردد مجال المنع w_s : $w_s = [0.075 \quad 0.7]\pi\, rad/sample$

3– تموج مجال التمرير R_p : $R_p = 3dB$

4– تخامد مجال المنع R_s : $R_s = 40\,dB$

5– درجة المرشح Filter Order: $N = 8$

6– تردد القطع w_c : $w_c = [0.13 \quad 0.5369]\pi\, rad/sample$

– تم حساب تردد القطع لهذا المرشح حسب المواصفات السابقة بمساعدة الحاسب باستخدام البيئة البرمجية (Matlab).

– تم الاكتفاء بتحديد طول الاستجابة النبضية لمسار الصدى بـ $h = 128$ وذلك من أجل سهولة الحسابات.

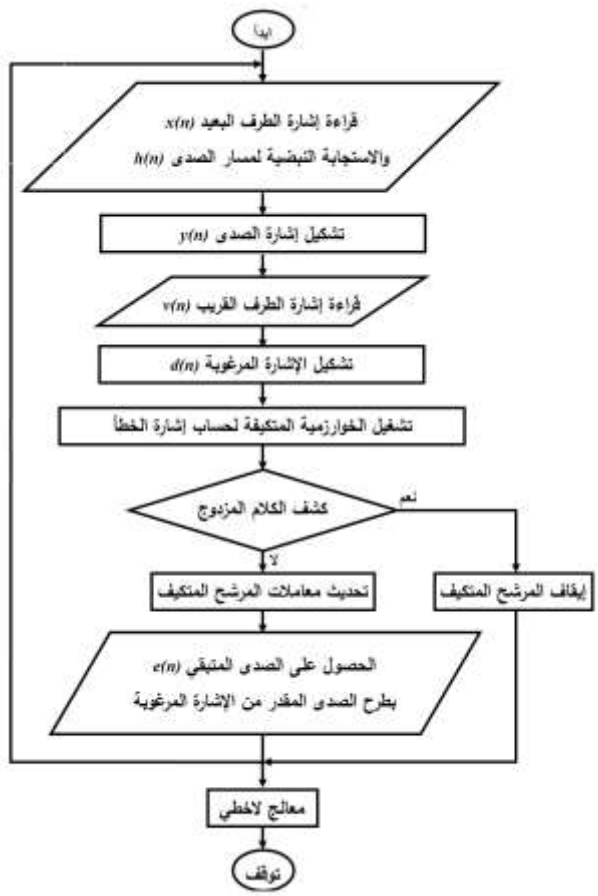
– تم الحصول على الإشارة المرغوبة (المطلوب معالجتها) من خلال جمع إشارة الطرف القريب مع إشارة الصدى (الناتجة على خرج مقلد مسار الصدى).

– تم في النموذج المقترح لمعالجة ظاهرة (مشكلة) الصدى استخدام مرشح رقمي متكيف FIR بطول (عدد المعاملات الوزنية) $L = 128$ وتم تحديد قيم كل من البارامترات الخاصة بالخوارزميات المستخدمة وفق الآتي:

– تم اختيار مقدار الخطوة $\mu = 0.18$ بشكل تجريبي في خوارزمية LMS، واختيار قيمة كل من مقدار خطوة التسوية $\zeta = 0.3$، وعامل الأمان $\delta = 0.01$، في خوارزمية NLMS، واختيار قيمة كل من عامل النسيان $\gamma = 0.88$، والثابت $\alpha = 0.14$، والثابت $\beta = 10^{-4}$، في خوارزمية RNLMS.

1-6- المخطط التدفقي لخوارزمية حاذف الصدى:

يوضح الشكل (2) المخطط التدفقي لخطوات تنفيذ خوارزمية حاذف الصدى باستخدام خوارزميات التكيف (LMS-NLMS-RNLMS) [3].



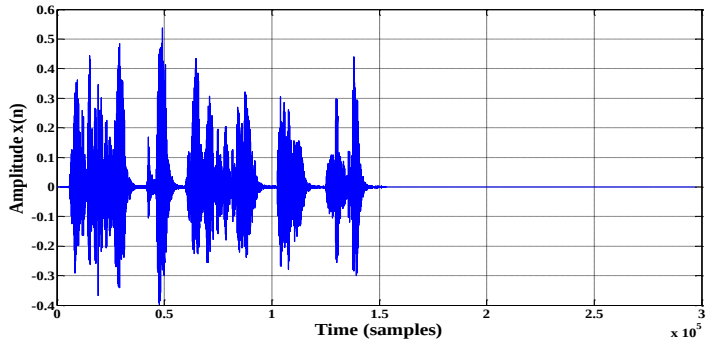
الشكل (2) المخطط التدفقي لخوارزميات حاذف الصدى المتكيف

6-2- نتائج تنفيذ المحاكاة ضمن البيئة البرمجية (Matlab).

توضح الأشكال التالية أداء حاذف الصدى باستخدام كل من خوارزميات التكيف (LMS) و(NLMS) و(RNLMS) حيث تم عرض كل من الإشارات التالية:

- إشارة الطرف البعيد Far End Signal (FES):

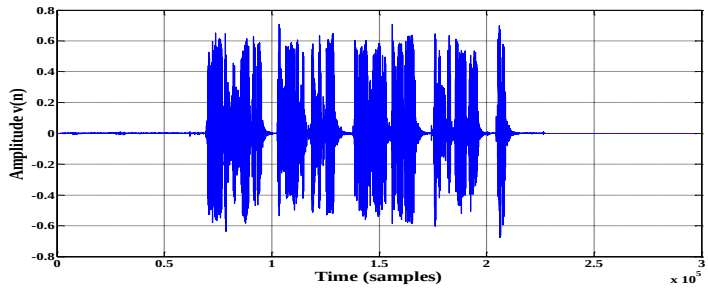
يوضح الشكل (3) إشارة الطرف البعيد $x(n)$، حيث تم تسجيل الإشارة الصوتية ضمن المجال الزمني (0sec-10sec).



الشكل (3) إشارة الطرف البعيد (FES)

- إشارة الطرف القريب Near End Signal (NES):

يوضح الشكل (4) إشارة الطرف القريب $v(n)$، حيث تم تسجيل الإشارة الصوتية ضمن المجال الزمني (5sec-15sec).

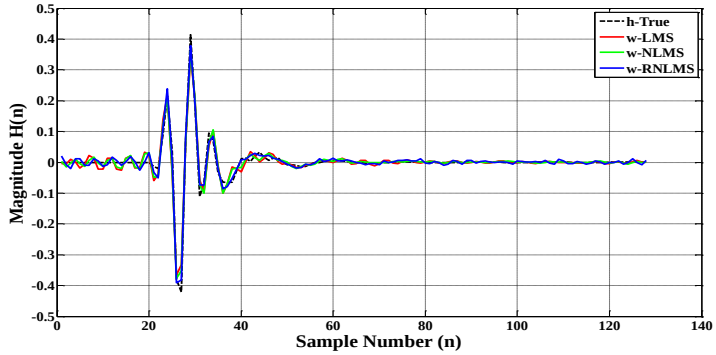


الشكل (4) إشارة الطرف القريب (NES)

- الاستجابة النبضية (Impulse Response):

يعمل المرشح المتكيف أثناء الأداء في الوقت الحقيقي على تقدير قيمة الاستجابة النبضية (شعاع المعاملات الوزنية $\boldsymbol{h}$) لمسار الصدى. يوضح الشكل (5)

الاستجابة النبضية الحقيقية $\boldsymbol{h}$ والمقدّرة $\boldsymbol{w}_{LMS}(n)$ و $\boldsymbol{w}_{NLMS}(n)$ و $\boldsymbol{w}_{RNLMS}(n)$ لمسار الصدى في كل من الخوارزميات (LMS) و(NLMS) و(RNLMS) على الترتيب.

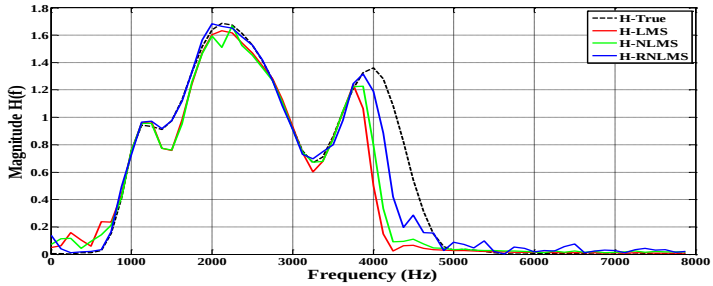


الشكل (5) الاستجابة النبضية الحقيقية $\boldsymbol{h}$ (True Impulse Response) والاستجابة النبضية المقدّرة (Estimate System $\boldsymbol{w}_{LMS}(n), \boldsymbol{w}_{NLMS}(n), \boldsymbol{w}_{RNLMS}(n)$)

نلاحظ من الشكل (5)، يمكن أن تتقارب الاستجابة النبضية المقدّرة عند استخدام كل من الخوارزميات الثلاث إلى الاستجابة النبضية الحقيقية لمسار الصدى.

- الاستجابة المطالية الترددية (Frequency Response):

يمكن التعبير عن عمل المرشح المتكيف في المجال الترددي، حيث يعمل أثناء الأداء في الوقت الحقيقي على تقدير قيمة الاستجابة الترددية $H(f)$ لمسار الصدى. يوضح الشكل (6) الاستجابة الترددية الحقيقية $H(f)$ والاستجابة الترددية المقدّرة $H_{LMS}(f)$ و $H_{NLMS}(f)$ و $H_{RNLMS}(f)$ لمسار الصدى عند استخدام كل من الخوارزميات (LMS) و(NLMS) و(RNLMS) على الترتيب.

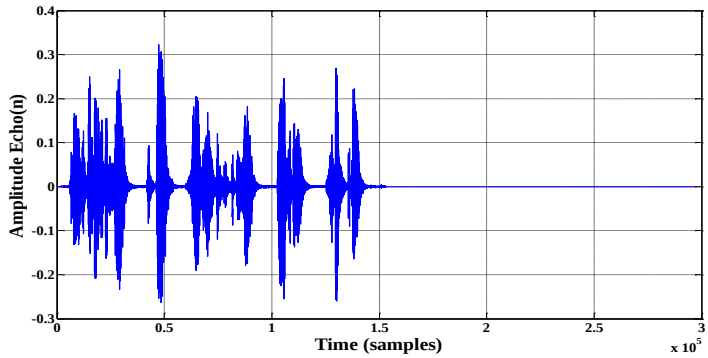


الشكل (6) الاستجابة الترددية الحقيقية $H(f)$ (True Frequency Response) والاستجابة الترددية المقدّرة (Estimate System $H_{LMS}(f), H_{NLMS}(f), H_{RNLMS}(f)$)

نلاحظ من الشكل (6)، يمكن أن تتقارب الاستجابة الترددية المقدّرة لكل من الخوارزميات الثلاث تقريباً إلى الاستجابة الترددية الحقيقية لمسار الصدى.

- إشارة الصدى (Echo Signal):

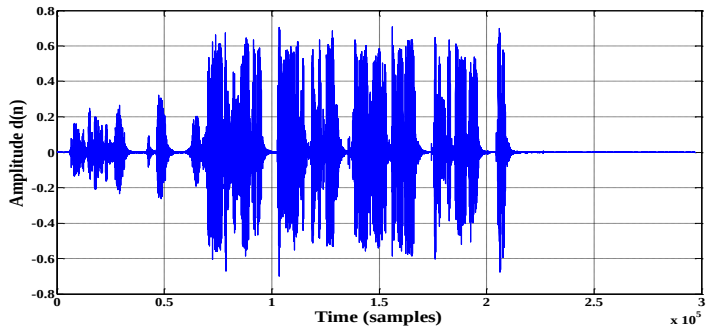
يوضح الشكل (7) إشارة الصدى الناتجة على خرج نموذج مسار الصدى.



الشكل (7) إشارة الصدى (Echo Signal)

- الإشارة المرغوبة (Desired Signal):

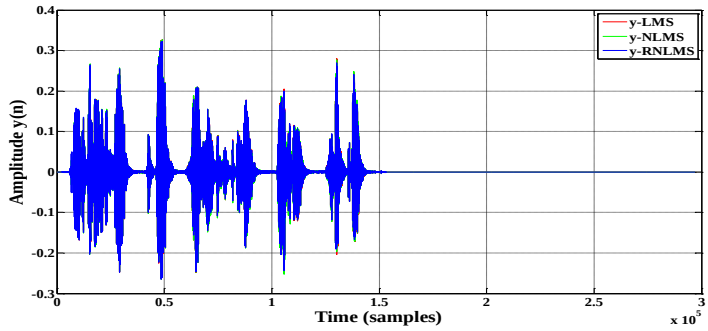
يوضح الشكل (8) الإشارة المرغوبة $d(n)$ والتي تم الحصول عليها برمجياً من خلال جمع كل من إشارة الطرف القريب $v(n)$، وإشارة الصدى $y(n)$.



الشكل (8) الإشارة المرغوبة (Desired Signal)

- إشارة خرج المرشح (Output Signal):

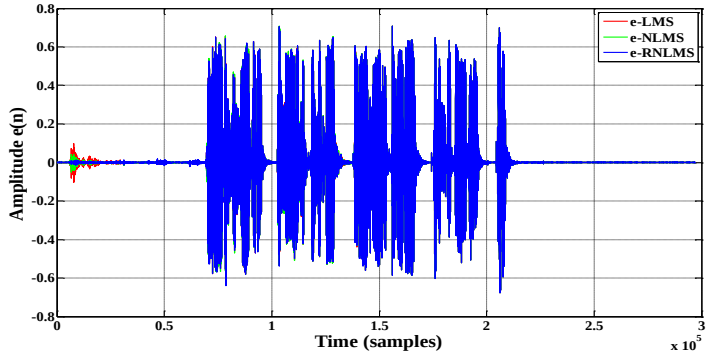
يوضح الشكل (9) إشارة خرج المرشح $\hat{y}(n)$ عند استخدام كل من الخوارزميات (LMS) و(NLMS) و(RNLMS) على الترتيب، حيث يقوم المرشح المتكيف بتقدير إشارة الصدى.



الشكل (9) إشارة خرج المرشح المتكيف عند استخدام خوارزميات (LMS,NLMS,RNLMS)

- إشارة الخطأ (Error Signal):

تعبّر إشارة الخطأ $e(n)$ عن الإشارة التي سيتم سماعها من قبل الطرف البعيد والتي من المفترض أن تكون خالية من أي إشارات غير مرغوبة (صدى أو ضجيج)، يوضح الشكل (10) إشارة الخطأ $e_{LMS}(n)$ و $e_{NLMS}(n)$ و $e_{RNLMS}(n)$ الناتجة عند استخدام كل من خوارزمية LMS و NLMS و RNLMS على الترتيب.



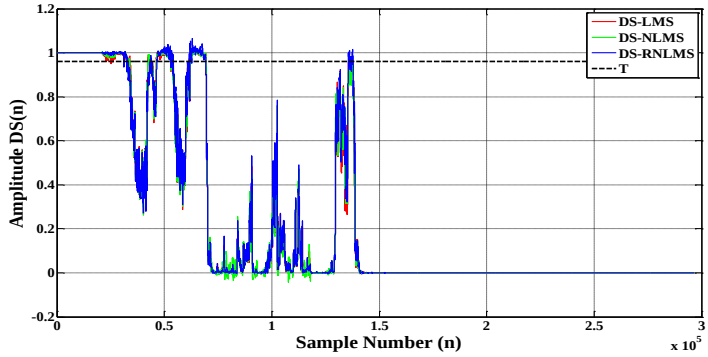
الشكل (10) إشارة الخطأ ($e_{LMS}(n)e_{NLMS}(n)e_{RNLMS}(n)$ (Error Signal

بالنظر إلى الشكل (10) فمن السهل أن نرى أن إشارة الخطأ الناتجة عن خوارزمية RNLMS أكثر إقناعاً من إشارات الخطأ الناتجة عن كل من خوارزمية LMS و NLMS.

- كشف الكلام المزدوج (DTD):

يتم مقارنة القرار الإحصائي (الخط المستمر) إلى عتبة T (الخط المتقطع). إذا كانت ($\xi_{NCC}(n) > T$)، فإن الطرف البعيد فقط يتحدث، أما إذا كانت

($\xi_{NCC}(n) < T$) فإنه يتواجد إشارات الكلام المزدوج أو الطرف القريب فقط أو كلا الطرفين في حالة الصمت. يوضح الشكل (11) خرج كاشف الكلام المزدوج عند استخدام كل من خوارزمية LMS و NLMS و RNLMS على الترتيب.

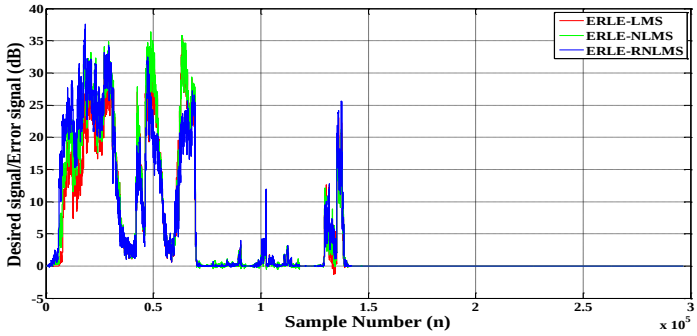


الشكل (11) خرج كاشف الكلام المزدوج (DTD-LMS,NLMS,RNLMS)

بالنظر إلى الشكل (11)، فإن القرار الإحصائي (DS) للكلام المزدوج في خوارزمية RNLMS هو أفضل من القرار الإحصائي للكلام المزدوج لكل من خوارزمية LMS وخوارزمية NLMS (أكثر دقة).

– تحسين ضياع الصدى الراجع (ERLE):

يُستخدم هذا البارامتر من أجل تقييم جودة أداء حاذف الصدى، فكلما زاد مقدار ضياع الصدى الراجع كلما عبر ذلك عن جودة أداء حاذف الصدى. يوضح الشكل (12) تحسين ضياع الصدى الراجع (ERLE) عند استخدام كل من خوارزمية LMS و NLMS و RNLMS على الترتيب.

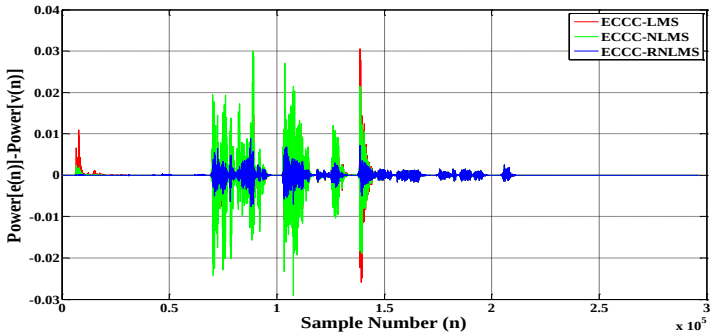


الشكل (12) تحسين ضياع الصدى الراجع (ERLE-LMS,NLMS,RNLMS)

يعتبر أداء خوارزمية حذف الصدى جيداً، إذا كانت قيم ERLE في حدود (30dB-40dB). بالنظر إلى الشكل (12)، يتبين أن كل من الخوارزميات LMS وNLMS وRNLMS، حققت قيم ERLE المطلوبة (ضمن المجال المحدد)، وبالتالي فإن الخوارزميات الثلاث تعمل بشكل جيد، ومن الجدير بالذكر أن خوارزمية RNLMS حققت قيم ERLE أكبر مما حققته كل من خوارزمية LMS وNLMS.

- معيار معامل حذف الصدى (ECCC):

تم اقتراح هذا البارامتر من أجل تقييم جودة خوارزمية حذف الصدى، فكلما كان مقدار هذا البارامتر صغير ويقترب من الصفر كلما عبر ذلك عن جودة أداء حاذف الصدى. يوضح الشكل (13) معيار معامل حذف الصدى (ECCC) عند استخدام كل من خوارزمية LMS وNLMS وRNLMS على الترتيب.



الشكل (13) معيار معامل حذف الصدى (ECCC -LMS,NLMS,RNLMS)

بملاحظة الشكل (13)، يتبين أن خوارزمية RNLMS تعمل على حذف إشارة الصدى بفعّالية أكبر منه في الخوارزمية LMS والخوارزمية NLMS وذلك أثناء مرحلة التقارب، وأثناء مرحلة الاستقرار (الوصول الى المعاملات الوزنية الأمثلية).

7- النتائج والمقترحات Conclusion & Future Work:

من خلال المحاكاة الحاسوبية وتحليل الأشكال الناتجة عن هذه المحاكاة، يمكننا تسجيل النتائج على النحو التالي:

1- تعتبر خوارزمية التكيف LMS الأكثر شيوعاً، وذلك لبساطتها الحسابية وسهولة تنفيذها على الحواسب الشخصية وكذلك على الشرائح التكاملية.

2- تم التحكم في تقارب خوارزمية المرشح المتكيف LMS وضبطها عن طريق تغيير حجم خطوة التكيف μ تجريبياً، حيث تبين أنه عند اختيار قيم كبيرة لحجم الخطوة μ (ضمن الحدود المسموحة) تزداد سرعة التكيف (معدل التقارب) وهذا يؤثر إيجاباً على أداء حاذف الصدى المتكيف، ولكن بالمقابل فإن ضجيج التكيف يزداد مما يؤثر سلباً على أداء حاذف الصدى المتكيف. لذلك ومن خلال التجريب تم اختيار قيمة حجم الخطوة $\mu = 0.18$ بحيث تحقق لدينا أفضل أداء ممكن لحاذف الصدى المتكيف عند استخدام خوارزمية التكيف LMS.

3- أظهرت النتائج عند استخدام خوارزمية NLMS ازدياد فعالية أداء حاذف الصدى المتكيف، من خلال زيادة سرعة التقارب وحذف إشارات الصدى بالمقارنة مع أدائه عند استخدام خوارزمية LMS.

4- أظهرت النتائج عند استخدام الخوارزمية المقترحة RNLMS ازدياد فعالية أداء حاذف الصدى المتكيف، من خلال زيادة سرعة التقارب وحذف إشارات الصدى بالمقارنة مع أدائه عند استخدام كل من خوارزمية LMS وخوارزمية NLMS.

5- نلاحظ أن كل من الخوارزميات LMS وNLMS وRNLMS أعطت مخططات ERLE ضمن النطاق المحدد (30dB-40dB)، كما هو مبين في الشكل (12)، وبالتالي تعمل الخوارزميات الثلاث بشكل جيد.

6- نلاحظ أن كل من الخوارزميات LMS وNLMS وRNLMS أعطت مخططات ECCC ذات قيم قريبة من الصفر، وتبين أن أداء حاذف الصدى المتكيف عند استخدام الخوارزمية المقترحة RNLMS أفضل بالمقارنة مع أدائه عند استخدام كل من خوارزمية LMS وخوارزمية NLMS، كما هو مبين في الشكل (13).

7- بالنتيجة النهائية عند المقارنة بين أداء حاذف الصدى المتكيف عند استخدام الخوارزميات LMS وNLMS وRNLMS تبين أن أداؤه عند استخدام الخوارزمية المقترحة RNLMS أفضل بالمقارنة مع أدائه عند استخدام كل من خوارزمية LMS وخوارزمية NLMS.

يمكن اقتراح تنفيذ حاذف الصدى المتكيف على الشرائح القابلة للبرمجة FPGA باستخدام لغة برمجة المكونات الصلبة VHDL بالاعتماد على البيئة البرمجية (Quartus-II).

المراجع:

1. Vaseghi, S. V., 2000- **Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction**. John Wiley & Sons Ltd, 2nd Ed, pp. 396-415.
2. H. Alaeddine, E.H. Baghious, G. Madre and G. Burel., 2006- **Realization of Block Robust Adaptive Filters using Generalized Sliding Fermat Number Transform**. 14th European Signal Processing Conference, Florence, Italy, copyright by EURASIP.
3. Nguyen, N. H.,& Dowlatnia, M.,& Sarfraz, A., 2009- **Implementation of the LMS and NLMS algorithms for Acoustic Echo Cancellation in teleconference system using MATLAB**, Vaxjo University,.
4. B.Widrow and M.E.Hoff, 1960- "**Adaptive switching circuits**," Proc. Of WESCON Conv. Rec ., part 4, pp.96-140.
5. Kong-Aik Lee, Woon-Seng Gan, Sen M. Kuo, 2009- **Sub band Adaptive Filtering: Theory and Implementation**, John Wiley & Sons, Ltd.
6. **خضر** مدين، 2009– **المرشحات المتكيفة**. أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، حلب.
7. Candy, J. V, 2006- **MODEL-BASED SIGNAL PROCESSING**, A John Wiley & Sons, Inc., University of California.
8. **ميكائيل** فيفاء، 2008– **دراسة ومعالجة ظاهرة الصدى في الاتصالات الفضائية**. رسالة ماجستير، جامعة تشرين، اللاذقية.
9. Raghavendran, S., 2003- **Implementation of an Acoustic Echo Canceller Using Matlab**, University of South Florida.
10. John Wiley & Sons, 2011- **Digital Signal Processing Using Matlab For Students And Researchers**, A John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
11. **خضر** مدين، 2018 – **معالجة الإشارة**. أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، الطبعة الثانية– حلب.