مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (5) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (5) 2016

دراسة فعالية وجودة الصوت في خوارزميات ضغط الصوت

فاتن فاروسي *

(تاريخ الإيداع 26 / 7 / 2016. قُبِل للنشر في 20/ 9 / 2016)

□ ملخّص □

يعد الصوت عنصراً أساسياً من عناصر الأوساط المتعددة، ونتيجة الحاجة إلى استخدامه في كثير من التطبيقات الحياتية كالبث التلفزيوني وبرامج التواصل، لذا كانت الضرورة لوجود تقنيات لمعالجة إشارة الصوت من ضغط وتحسين وتقليل ضجيج

تكمن أهمية عملية ضغط البيانات في تخفيض معدل البتات المستخدمة، وذلك عن طريق ترميز المعلومات باستخدام عدد أقل من البتات من التمثيل الأصلي من أجل الإرسال والتخزين. حيث تقوم بتحديد المعلومات غير الضرورية وإزالتها،أي تعطي المعلومات التي ضُغطت ضغط الاستخدام ما نحتاجه كشكل أساسي وليس أدق التفاصيل.

يهدف البحث إلى دراسة كيفية معالجة الصوت والإشارة الموسيقية، وهي عملية تضم بعض التطبيقات كالترميز والضغط الرقمي بهدف النقل الفعال والتخزين على الهواتف النقالة ومشغلات الموسيقا المحمولة، ونمذجة واستنساخ صوت الآلات الموسيقية وقاعات الموسيقا وتوافقيات الموسيقا الرقمية، وتحرير الموسيقا الرقمية، وتصنيف محتوى الموسيقا بالإضافة إلى أمور أخرى.

الكلمات المفتاحية: التعديل النبضي المرمز (PCM)، معدل أخذ العينات، خوارزمية MPEG، تحويل التجب المتقطع(DCT)

* مشرفة على الأعمال – قسم الاتصالات–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة تشرين–اللاذقية–سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (5) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (5) 2016

A Study of The Effectiveness and Sound Quality in Audio Compression Algorithms

Faten Faroussi*

(Received 26 / 7 / 2016. Accepted 20 / 9 / 2016)

□ ABSTRACT □

The sound is an essential component of multimedia, and due to the needto be used in many life applications such as television broadcasting andcommunication programs, so it was necessary for the existence of audio signal processing techniquessuch as compressing, improving, and noisereduction.

Data compression process aims to reduce the bit rate used, by doing encoding information using fewer bits than the original representation for transmitting and storing. By this process,the unnecessary information is determined and removed, that means it gives the compressed information for useable compression, which we need as a fundamental, not the minutest details.

This research aims to study how to process sound and musical signal. It's a process that consists of a wide range of applications like coding and digital compression for the effective transport and storage on mobile phones and portable music players, modeling and reproduction of the sound of musical instruments and music halls and the harmonics of digital music, editing digital music, and classification of music content, and other things.

Key words: Pulse code modulation (PCM), Sample rate, MPEG(Moving Pictures Experts Groups) Algorithm, Discrete Cosine Transform (DCT),

* **Electronic Engineer, Department of Communication, Mechanical & Electrical Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, Syria**

مقدمة:

تعد أنظمة وآلات الموسيقى من الاختراعات البشرية المبكرة التي وبشكل حدسي تم وضعها واستيعابها، وتم استخدامها للعلاقات بين التوافقيات قبل استخدام الرياضيات لمثل تلك العلاقات. وبشكل مشابه كانت النوتات ولوحات مفاتيح الآلات الموسيقية كالموجودة على البيانو مطابقة تماماً لتخطيطات وثبات الترددات الموجودة في نظام السمع البشري، عرف ذلك حتى قبل تطور المعرفة العلمية والرسمية لعلم التشريح ووظائف تحليل التردد لقوقعة الأذن البشرية [51].

غالباً ماتكون طرق معالجة الموسيقا الرقمية عبارة عن امتدادات وتكيفات لطرق معالجة الإشارة التي وضعت لمعالجة الكلام. وتسهل طرق معالجة الإشارة الموسيقية (والتي هي الطرق المستخدمة في الترميز، فك الترميز، التوليف، فهرسة وتكوين محتوى الإشارات الموسيقية) بعض المتطلبات الأساسية الموجودة في نظام الاتصال الحديث المتعدد الوسائط [62].

بدأت المعالجة الرقمية للموسيقا على نطاق واسع بإدخال القرص المضغوط CD عام 1980 والذي حل محل أشرطة الكاسيت التي سيطرت على الأسواق لعقود. وظهرت مشغلات الوسائط المتعددة لتفتح سوقاً جديدة واعدة في مجال صناعة الموسيقا (موسيقا الانترنت، موسيقا الأجهزة المحمولة والنقالة)، واستمر انتشارها بوجود البحوث الجارية للنسخ التلقائي وفهرسة الإشارات الموسيقية ونمذجة الآلات الموسيقية [5],[4],[3].

ظهرت عملية ترميز الصوت Audio codec، والتي تهدف إلى ضغط البيانات الصوتية الرقمية عن طريق خوارزميات الضغط لتقليل مساحة التخزين وعرض النطاق الترددي اللازم لتخزين الملفات.

تتضمن بعض تطبيقات طرق معالجة الإشارة الموسيقية ما يلي:

. الترميز الموسيقي للتخزين الفعال، وإرسال الإشارات الموسيقية مثل MP3، وترميز النقل التكيفي للصوت الخاص بشركة SONY [87].

.الحد من الضوضاء وتسوية التشويه مثل أنظمة دولبي[108]، واستعادة التسجيلات الصوتية القديمة المتضمنة لخشخشات وهمسات، الخ، وأنظمة معالجة الإشارة التي تعد مثالاً وتعويضاً عن الخصائص غير المثالية لمكبرات الصوت والقاعات الموسيقية.

. التآلف الموسيقي ومعالجة الحدة، خلط الصوت، تركيب الصوت، تحرير الصوت، التركيب الموسيقي الإلكتروني.

. نسخ الموسيقا وتصنيف المحتوى، محركات البحث الموسيقي للإنترنت.

. المؤثرات الصوتية الموسيقية كالموجودة في دور السينما والمسارح.

أهمية البحث وأهدافه:

إن الهدف من هذا البحث هو دراسة كيفية معالجة الصوت والإشارة الموسيقية، وإظهار أهمية عملية ضغط البيانات والتي تؤدي إلى تخفيض معدل البتات المستخدمة، كما يستعرض البحث أهم الملفات الرقمية الصوتية المستخدمة وأهمها ملفات MP3 الأكثر انتشاراً والتي تعتبر المعيار المهيمن على كل ملفات الصوت الرقمي. حيث تسمح بإنشاء ملفات صوتية ذات جودة مرتفعة على الحاسوب الشخصي، ثم وضعها على قرص مدمج قابل للكتابة، وتحميلها على جهاز المشغل الرقمي الشخصي، ونشرها عبر الإنترنت.

طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث إتباع الخطوات التالية:

1 - دراسة تصنيف الآلات الموسيقية وكيفية تمثيل الصوت.

2 - دراسة جودة صوت الأقراص المدمجة CD.

3 - دراسةضغط الإشارة الموسيقية عن طريق التعرف على كيفية ضغط الصوت، ومن ثم وضع المبادئ الأساسية لضغط الموسيقا وهياكل الإشارة المستخدمة في ضغط الموسيقا.

4 - دراسة طريقة عمل مبرمجات الصوت ومنها المبرمج MPEG.

5 - دراسة الصيغ الأخرى المستخدمة في ضغط الصوت.

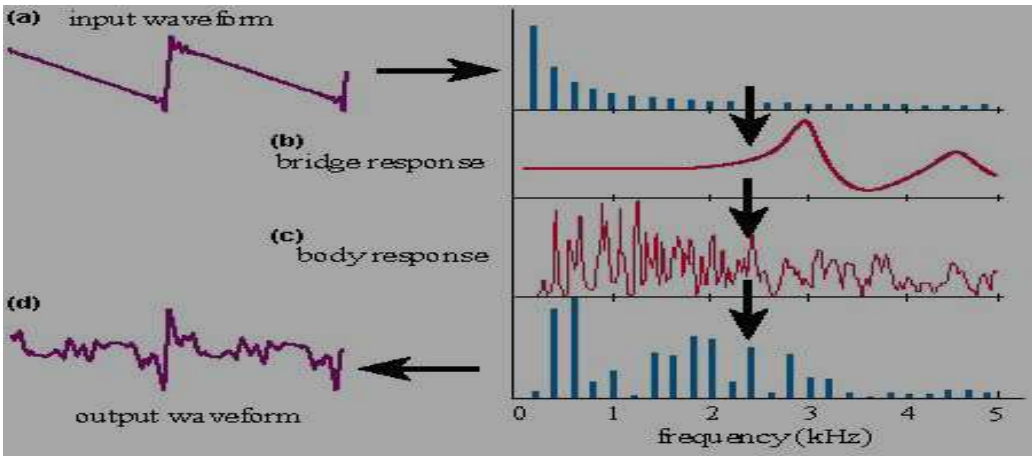
6 - وضع النتائج وذلك عن طريق إجراء مقارنة بين خوارزميات ضغط الصوت لإبراز مميزات وعيوب كل منها، ثم دراسةت طبيق عملي على بحثنا، والذي يتضمن أمثلة عملية تم من خلالها نمذجة إشارات صوتية وتحليلها باستخدام طرق برمجية وأخرى رياضية عن طريق برنامج MATLAB.

1 - دراسة تصنيف الآلات الموسيقية وكيفية تمثيل الصوت:

1-1 - تصنيف الآلات الموسيقية: يوجد عدد من الأنظمة المختلفة لتصنيف الآلات الموسيقية كالتصنيف الشعبي الذي يعتمد على كيفية وضع الهواء بالنسبة للاهتزازات، كأن نقول الآلات الوترية،النفخية، النحاسية،الإيقاعية،.... والتصنيف الأكاديمي الذي يعتمد على مادة الاهتزاز التي تصدر الصوت. ويبين الشكل (1) توضيحاً بيانياً لموجة الدخل والخرج لآلة الكمان والطيف الموافق له، مترافقة مع الاستجابة الترددية لجسر الكمان وجسم الكمان[159].

1-2-كيفية تمثيل الصوت: يوجد نوعان للإشارة الصوتية الأولى إشارات الكلام والتي تتراوح تردداتها بين (30HZ -10KHZ) والمستخدمة في كثير من التطبيقات الشخصية كالاتصالات الهاتفية والاتصال الفيديوي. والثانية هي صوت جودة الموسيقا الذي تتراوح تردداته بين (20HZ -20KHZ)، كالمستخدم في تطبيقات البث التلفزيوني والأقراص المدمجة CD.

نستطيع استخدام الإشارة بشكل رقمي حتى يمكن التعامل معها في جهاز الكومبيوتر أو أجهزة أخرى، وذلك باستخدام طرق التعديل النبضي PCM، وأخذ العينات (حيث تتحول الإشارة التشابهية إلى قطار نبضات، كل منها تمثل مطال الإشارة التشابهية في لحظة معينة، وكل رقم يسمى " عينة " Sample. الرقم sps يسمى معدل أخذ العينة Sample per second ويقاس بواحدة sps أو ksps). وكذلك نستطيع استخدام الإشارة بشكلها التشابهي وتحويلها إلى الشكل الرقمي كما نفعل عند استخدام الميكروفونات.



الشكل(1): مخطط بياني لصوت آلة الكمان: (a) شكل موجة الدخل، (b) استجابة جسر الكمان، (c) استجابة جسم الكمان، (d) شكل موجة الخرج.

من أجل إشارة الكلام المستخدمة في النظام الأحادي (mono) يكون معدل أخذ العينات هو:

10KHZ*2 =20 KHZ

وفي النظام المزدوج (Stereo) يكون الرقم هو الضعف(لأنه يتطلب قناتين منفصلتين):

Stereo=2mono=2*20=40KHZ

وبما أن الحد الأدنى لكل عينة لتجنب ضجيج التكميم هو 12bit يصبح معدل البت لدينا:

12*20=240KSPS

(معدل البت للقناة = معدل التقطيع *عدد البتات لكل عينة).

فعند اختيار الحد الأدنى لعدد بتات كل عينة للإشارة، يجب أن يكون ضجيج التكميم الحاصل بعد عملية التقطيع بدرجة مقبولة بالنسبة لأصغر شدة للإشارة.

_ من أجل إشارة الموسيقا الأحادية Mono يكون معدل أخذ العينات: 20KHZ*2=40KHZ

والحد الأدنى لكل عينة لتجنب ضجيج التكميم هو 16bit فيكون معدل البتات: 16*40=640KSPS

_ إشارة الستيريو الموسيقية هي ضعف إشارة الMono فيكون معدل البت:

2*Mono=2*640=1280KSPS

فتكون الذاكرة المطلوبة لتسجيل 10 دقائق من الموسيقا الستيريو حجم كبير جداً ويساوي:

Bitrate [bps]*time [sec]/8[byte] = (1280*10*60)/8 = 96Mbyte

2 - دراسة جودة صوت الأقراص المدمجة CD:

تستخدم الأقراص الموجودة في مشغلات الأقراص CD و CD–ROM أجهزة التخزين الرقمية لإشارة الصوت Mono و Stereo. وهذه الأجهزة تعرف بمعيار الصوت الرقمي (CD Digital average) CD–DA . وكما ذكرنا فإن معدل التقطيع الأدنى لأخذ العينات من الإشارة الموسيقية هو 40KSPS ولكن معيارياً يستخدم المعدل بنسبة أعلى مثل 44.11KSPS أي تؤخذ عينة الإشارة عند 32µSec وذلك من أجل:

1. السماح باستخدام مرشحات الحزمة حتى في حالة عدم كمال عملها (إن الترددات العالية تسمح باستخدام مرشحات أكثر دقة لفصل الإشارة المطلوبة)[1710].

2. تكون نسبة البايت الناتجة متوافقة مع قنوات النقل ذات معدل النقل العالي، حيث إن الترددات العالية تؤدي إلى معدل نقل بت عالي وهذا ما يتوافق مع شبكات النقل عالية المعدل.

إذاً عند تسجيل أو إنتاج قرص ليزري يحتوي مقطوعة موسيقية يتم تقطيع المعلومات التناظرية وتحويلها إلى معلومات رقمية بمعدل 44110 مرة كل ثانية أو 44.11KSPS وكل عينة تحجز 2Byte أي16bit. يتم تخزين كل عينة مرتين واحدة للسماعة اليمين والثانية لليسار في نظام الستيريو. وبعملية حسابية بسيطة يمكن معرفة المساحة المطلوبة لتخزين زمن ثانية من الصوت على قرص ليزري CD:

معدل البت للقناة الواحدة Mono: 44.11KSPS*16bit=705.6Kbps

وللستيريو: 705.6*2channals=1.411Mbps

أي أنه يلزمنا مساحة تخزين قدرها 1.4Mbit لكل ثانية، أي 1.4Mb/8=176Kbyte فإذا افترضنا أنه في المتوسط يصل زمن أغنية إلى 3 دقائق فإن هذه الأغنية ستخزن على قرص الليزر مستغلة مساحة قدرها: 176Kbyte*3*60=31680Kbyteأوتقريباً .32Mbyte وهذا حجم كبير جداً يصعب التعامل معه على الإنترنت وتحتاج إلى أكثر من ساعتين لتحميله على الحاسب في حالة استخدام مودم الاتصال بالإنترنت. إذاً باستخدام معيار CD-DA تكون سعة تخزين CD-ROM لـ60 دقيقة هي:

1.411Mbps*60*60=5079.6Mb= 5079.6/8 = 634.95MByte

وهنا تظهر الحاجة إلى عملية ضغط الصوت من أجل تقليل معدل البت، وهذه العملية تؤدي لضغط البيانات مع فقد مقبول دون أن يكون له تأثير على جودة الصوت. أي فقد التفاصيل غير الضرورية من مصدر البيانات لتوفير مساحة التخزين.

3. ضغط الإشارة الموسيقية:

3-1- ضغط الصوت: رأينا أنه عند تحويل الإشارة السمعية إلى رقمية يتم الحصول على معدل بت هام نتيجة استخدام التعديل النبضي المرمز PCM، حيث يساهم الشكل الرقمي للإشارة بالحد من المعدل المرتفع الناتج عن كمية كبيرة من المعلومات. وهناك أيضاً التعديل النبضي المرمز التفاضلي DPCMالذي يقوم بتشفير الاختلاف بين سعتين متجاورتين وبالتالي يقلل المعدل الذي تم الحصول عليه، بالإضافة إلى التعديل النبضي التكيفي ADPCM للغرض نفسه[711].

ويوجد عدة طرق لضغط وتشفير الصوت أهمها:

* ا**لترميز التنبؤي الخطي (LPC) Liner predictive coding:** يستخدم لمعالجة الإشارة الصوتية والكلام، لتمثيل الغلاف الطيفي للإشارة الرقمية Spectral envelope للكلام في شكلها المضغوط وذلك باستخدام معلومات من نموذج تنبؤي خطي. وهو من أنجع تقنيات تحليل الكلام، وإحدى الطرق الأكثر فائدة لترميز كلام ذي نوعيةجيدة في معدل بت منخفض، ويقدم تقديرات عالية الدقة لبارامترات الكلام speech parameters [812].

* **الترميز التنبؤي التكيفي (APC) Adaptive predictive coding:** هو تحويل من تشابهي إلى رقمي للحزم الضيقة والذي يستخدم نظام تقطيع (أخذ عينات) وحيد المستوى أو متعدد المستويات، والذي تكون فيه قيمة الإشارة عند كل لحظة تقطيع متنبأ بها تبعاً لتابع خطي للقيمة السابقة للإشارات المكممة. إن ترميز APC مرتبط بLPC حيث أن كلاهما يستخدمان متكيفات تنبؤية. ومع ذلك فإن APC يستخدم درجات تكيفية أكثر، ولذلك يتطلب مستوى تقطيع أعلى منLPC [812].

***خوارزمية (MPEG) Moving picture experts group**: تم اعتماد MPEG من قبل المنظمة الدولية للمعايير ISO وذلك لصياغة مجموعة من المعايير ذات الصلة بنطاق التطبيقات المتعددة الوسائط الذي يضم استخدام الفيديو مع الصوت. حيث أن مبرمجات الصوت هي الترميز المرتبط بمسألة ضغط الصوت لتلك المعايير. وقد قامت جميع عمليات معالجة الإشارة المرتبطة بالمبرمج الحسي بتطبيق الرسم التخطيطي للمرمز الأساسي[113].

3-2-المبادئ الأساسية لضغط الموسيقا:

يعتمد الضجيج الكمي لمبرمج الموسيقا على عدد من العوامل تتضمن:

1. عدد البايتات لكل عينة.
2. كفاءة استخدام توزيع إشارة الموسيقا في نطاقات التردد والزمن.
3. كفاءة استخدام علم النفس السمعيPsychoacoustic(علم إدراك الصوت).

إن هدف ترميز الصوت هوالاستفادة من توزيع التردد بالنسبة لزمن الإشارة، إلى جانب تشكيل توزيع التردد-الزمن للضجيج الكمي بحيث يصبح الضجيج الكمي غير مسموع، وتصبح الإشارة المتجددة غير مميزة عن الإشارة الأصلية. يتم العمل بشكل عام عن طريق تحليل الإشارة بمجموعة من الوحدات بحيث تتوافق كل وحدة مع نطاق معين من الزمن والتردد. يتم تحليل الإشارة باستخدام توزيع الزمن وفقاً لمبادئ علم النفس السمعيPsychoacoustic. ويشير التحليل إلى أن مركبات التردد الطيفية هي حرجة للسمع، ويجب أن تكون مشفرة بأعلى دقة، وأن تحدد أكبر قدر من البايتات، ويشير أيضاً إلى أن مجموعة مركبات التردد ذات أهمية أقل وتستطيع أن تتحمل قدر أكبر من الضجيج المحسوس(المعدود) دون الحد من جودة الصوت المدركة. بناءً على هذه المعلومات يتم توزيع وتخصيص البتات المتوفرة على مجموعات التردد-الزمن، ويتم إحصاء المعاملات الطيفية لكل مجموعة تردد بالبتات المخصصة، أما بالنسبة لمفكك الترميز، فيتم إعادة بناء الأطياف المعدودة وفقاً لنمط توزيع البايت ومن ثم توليفها على شكل إشارة صوتية [214].

3-3-هياكل الإشارة المستخدمة في ضغط الموسيقا:

يستخدم في برمجة الموسيقا العامة ثلاثة جوانب للإشارات وذلك للحد من معدل البايت وبنفس الوقت الحفاظ على الدقة العالية، وهذه الجوانب هي:

1. بناء ارتباط الإشارات الموسيقية: هذا يعني أن جزء من العينة $m(x)$ المستمدة من عينات سابقة تستطيع أن تكون نموذجاً وليس من الضرورة أن تنقل.
2. علم إدراك الصوت Psychoacoustic(علم النفس السمعي): وهذا يعني أن المستوى غير المسموع من الضجيج المعدود عند كل مركب لتردد-الزمن يكون متغيراً، ويعتمد على كمية الضجيج التي يمكن أن تطلب.
3. التوزيع الإحصائي لإشارات الموسيقا: وهذا يعني أن التوزيع الاحتمالي يمكن أن يستخدم لإحصاءات فعالة وغير موحدة، بالإضافة إلى استخدامه في الانتقال الفعال. وذلك عن طريق ترميز طول متغير.

تكون هياكل الإشارة المستخدمة في ترميز الموسيقا بشكل خاص كالتالي:

تستطيع الارتباطات ذات المدى القصير للعينات المتتالية للموسيقا الموجودة ضمن الإطار الذي يتراوح بين 5-30ms أن تكون نموذجاً، وذلك بواسطة تحليل مركب المبدأ أو عن طريق نموذج التنبؤ الخطي LCP (مثال: تحويل التجب المتقطع DCT).

تستطيع الارتباطات والأنماط المتعاقبة ذات المدى الطويل أن تكون نموذجاً بواسطة كل من نماذج الدرجة وغلاف السعة، أو عن طريق نمذجة علاقة الإطارات المتتالية للموسيقا بتحويل التجب المتقطع DCT، أو عن طريق نموذج التنبؤ الخطي[1115].

يمكن أن نستخدم العلاقة المتواجدة بين قنوات اليسار واليمين لموسيقا جهاز التسجيل في ترميز قناة مشتركة وذلك بهدف الحد من نسبة البايت.

يمكن استخدام آثار إخفاء السمع الصوتي لتخصيص الحد الأدنى للبايتات، وذلك لكل جزء من الإشارة بحيث يبقى الضجيج المحسوس مخفي وتحت حد الضجيج.

3-4-التحليل الترددي الزمني:

يمكن إنجاز تحليل تردد- زمن الموسيقا باستخدام عدد من الطرق المختلفة:

1. تحويل التجب المتقطع DCT أو تحويل فوريير السريع FFT.
2. مجموعة مرشحات تمرير الحزمة، وذلك بهدف تقسيم الإشارة إلى نطاقات فرعية.
3. دمج لمرشح حزمة يليه تحليل تواتر أدق باستخدام التحويل، مثل استخدام DCT في مبرمج MPEGوأتراك سونيATRAC (وهي تقنية ضغط صوتية Adaptive Transform Acoustic Coding).

يعد تحليل تردد- الزمن الجزء المركزي لمبرمجي الموسيقا مثل MP3 و ATRAC. ففي MP3 تقسم الإشارة إلى 32 نطاق تردد متساوية العرض، ومن ثم تتحول الإشارات الفرعية إلى مكونات تردد أدق مستخدمة تحويل ثبات التردد المحسن مع الحفاظ على العينات الحرجة. أما في مبرمج ATRAK فتقسم الإشارة إلى ثلاثة نطاقات فرعية ويبلغ مدى نطاق الترددات عندها، الأول 0.5-5KHZ، والثاني 5.5-11KHZ، والثالث 11-22KHZ. تتم عملية تحليل الحزمة الفرعية باستخدام مرشحات مرآة التربيع QMF (وهي عبارة عن مرشحات filter banks تقوم بفصل إشارة الدخل إلى حزمتين إحداها إشارة تمرير منخفض والثانية تمرير عالي). إذاً تقسم إشارة الدخل إلى نطاقات علوية وسفلية بواسطة مرشح QMF الأول، كما يقسم النطاق العلوي مرة أخرى بواسطة مرشح QMF الثاني[1616]. يضمن استخدام مرشح QMF أن تعرجات نطاق الوقت الناتجة عن تحلل الحزمة الفرعية سوف تلغى خلال إعادة الإنشاء.

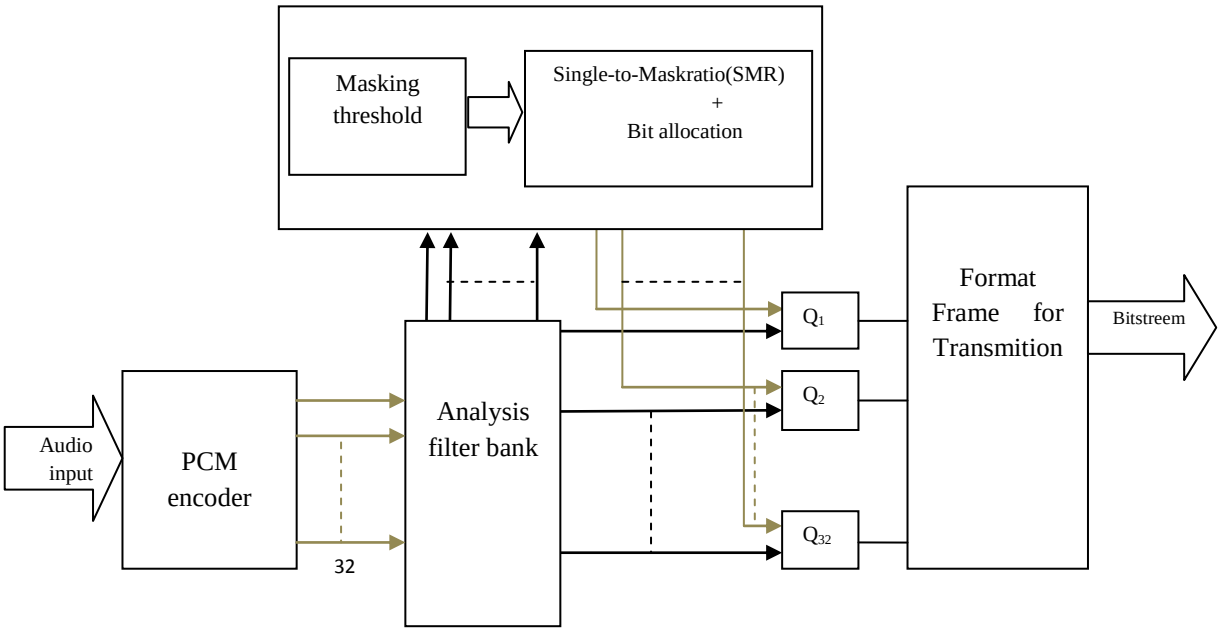
4. دراسة طريقة عمل خوارزميات الصوت ومنها الخوارزمية MPEG :

طورت مجموعة خبراء الصور المتحركة نظاماً لضغط ملفات الفيديو، فيمكن مثلاً ضغط ملفات DVD وملفات HDTV، أو الملفات المسجلة من القنوات الفضائية DSS وتحويلها إلى ملف MPEG ليصبح حجم ملف الفيديو مناسب. ويجدر بالذكر أن ملفات الفيديو تكون مصحوبة بالصوت بالإضافة إلى الصورة، وعند ضغط ملفات الفيديو إلى نسق MPEG يتم ضغط الصوت بنسق يسمى3 MPEG audio layer أي الطبقة الثالثة للصوت وتعرف اختصاراً MP3 [33].

1-4-طريقة عمل خوارزمية الصوت:

يتم تقطيع إشارة الدخل المتغيرة مع الزمن باستخدام إحدى مراحل ترميز PCM، ويحدد عدد العينات والبتات اللازمة للترميز عن طريق التطبيق المستخدم. يقسم عرض الحزمة اللازمة لنقل البيانات إلى عدد من الحزم الفرعية باستخدام عدد من المرشحات التحليلية والتي تدعى مرشحات الحزمة الحرجة نظراً لأدائها، وتكون الحزم الفرعية متساوية في عرضها. ويبين الشكل(2)الرسم التخطيطي للمشفرالأساسي للمبرمج MPEG:

تخصص مجموعة المرشحات 32 عينة زمنية من مرمز PCM لـ 32 عينة ترددية في كل حزمة فرعية وتدعى عينات الحزمة الفرعية، وتحدد المطال لكل من المركبات الترددية ا ل . 32 الموجودة في مقطع إشارة الدخل المتغيرة مع الزمن والتي تساوي 32 عينة PCM. تكون المدة الزمنية بالنسبة للمشفر الأساسي لكل جزء من عينات إشارة الدخل الصوتية مساوية للزمن اللازم لتراكم 12 مجموعة متتالية من العينات ا ل. 32 لمرمز PCM، ومن هنا تكون المدة الزمنية لعينات الحزمة الفرعية مساوية لعينات PCM، أي: 32*12=384

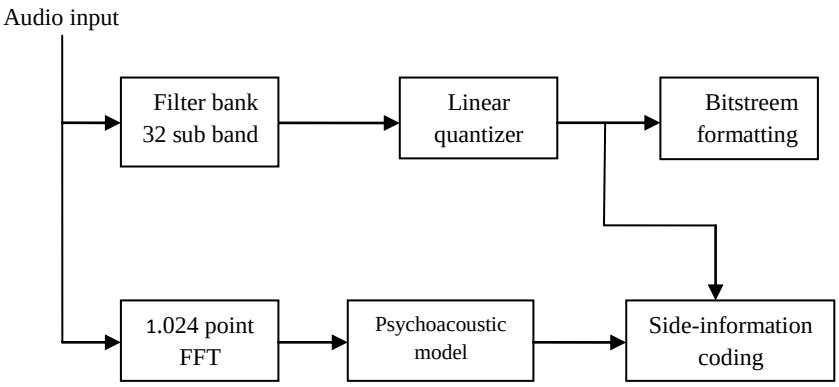


الشكل(2): الرسم التخطيطي للمشفر الأساسي لمبرمج MPEG.

يقوم المرشح DFT بترشيح عينات المدخلات إلى ترددات متفرقة ويعمل أيضا على تحديد السعة القصوى لكل فرع ثانوي من ا ل 12 عينة من الأفرع الثانوية. تعرف كل واحدة بعامل التدرج لكل مجموعة فرعية، ويتم تمرير هذا لكل من نموذج علم النفس السمعي Psychoacoustic model وكتلة القيمة المثبتة المقابلة مترافقة مع مجموعة عينات تردد لكل نطاق فرعي.

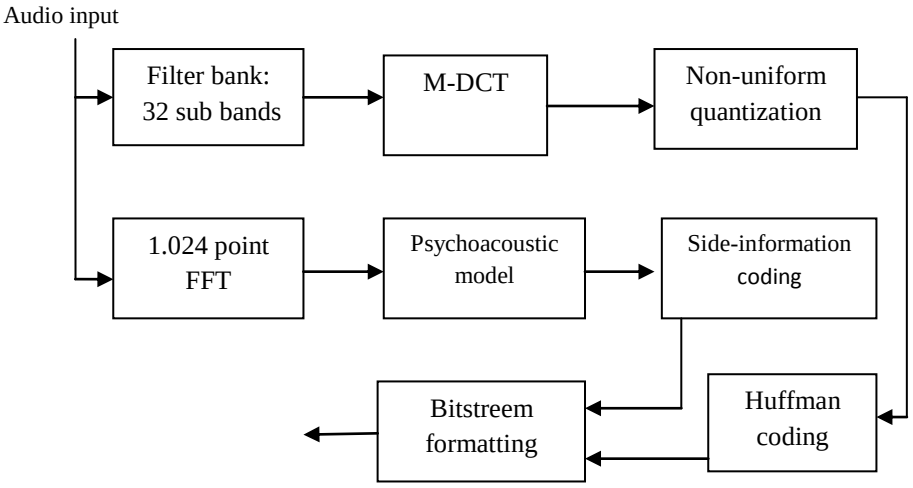
4-1-1- طبقات الخوارزميةMPEG:

هناك ثلاثة مستويات للمعالجة في طبقات صوت مبرمج MPEG تعود إلى معيار التوصية ISO والمعروفة بالطبقات: 1 و2 و3. تتوافق هذه الطبقات لأنها تضم نفس معلومات رأس الملف. تعد الطبقة MP1 هي الطبقة الرئيسية حيث يمكن أن تكون النوعية لديها جيدة جداً حيث تقوم بإعطاء معدل مرتفع نسبياً. عادة تستخدم الطبقة الأولى في الشريط الصوتي الرقمي. الطبقة الثانية MP2أكثر تعقيداً حيث وضعت للاستخدام في البث الصوتي الرقمي. ويبين الشكل (3) المخطط الصندوقي للطبقتين 1 و2.



الشكل (3): المخطط الصندوقي لمشغلات MPEG، الطبقتان MP1وMP2.

أما الطبقة الثالثة MP3هي الأكثر تعقيداً وتهدف بشكل أساسي لنقل الصوت عبر خطوط الشبكة الرقمية للخدمات المتكاملة ISDN(وهي جيل حديث من خطوط الهاتف يقدم من مزود الانترنت حيث يؤمن الاتصال الهاتفي مع اتصال الانترنت). أيضاً تقوم كل طبقة باستخدام تحويل تردد مختلف. توجد غالبية التعقيد عند المرمز أكثر من تواجدها عند كاشف الترميز وهذا هو سبب شعبية مشغلات MP3.ويبين الشكل (4) المخطط الصندوقي للطبقة MP3.



الشكل (4): المخطط الصندوقي للطبقة MP3.

بالمقارنة بين طبقات MPEG الثلاث نجد أن الطبقة MP3 تستخدم معدل بت مشابه للطبقتين 1 و2، ولكن بجودة صوت أفضل بكتير، وذلك بسبب زيادة التعقيد، حيث تحتوي MP3 على مرشح Filter bank مشابه للمستخدم في الطبقة الثانية، إلا أن مجموعة الإدراك الحسية الأساسية تلتزم بشكل أقرب إلى استخدام مجموعة من المرشحات بترددات غير متساوية. كما تأخذ هذه الطبقة بالحسبان ترددات جهاز المشغل. وأيضاً تستخدم تحويل التجب المعدل MDCT[14]،بغرض معالجة مشاكل DCTوذلك في حدود النافذة المستخدمة. حيث أن DCT هو تحويل رياضي قابل للعكس يحول الصورة من المجال المكاني إلى المجال الترددي، وتعتمد معظم تقنيات الصورة والترميز المرئي على هذه

الطريقة بعد تجزئة الصورة إلى بلوكات يسمى كل منها كتلة Block. هذه الطريقة هي أفضل طرائق ضغط الصورة والضغط المرئي ولكنها يمكن أن تؤدي في حالات الضغط بنسب عالية إلى ظهور الحدود الفاصلة بين الكتل في الصورة المعاد تركيبها (بعد فك الترميز). ويسمى هذا التشويه التأثير الكتلي أو العيوب الكتلية، فعندما تحسب مثل تلك البيانات ومن ثم تتحول عائدة إلى نطاق الوقت، عندها قد لا يتم تنسيق عينات البداية والنهاية للكتلة مع الكتل السابقة واللاحقة مما يسبب ضجيج متعاقب صوتي. تزيل MDCT مثل هذه الآثار بواسطة الإطارات المتداخلة بنسبة 50%.

4-1-2-أداء الضغط في مشغل MP3:

يبين الجدول (1) التالي نسب ضغط مختلفة تم تحقيقها في مشغل MP3، حيث نلاحظ أن القرص الليزري CD على وجه الخصوص استطاع أن يحقق جودة صوت بنسب ضغط مرتفعة.

الجدول (1): يبين نسب الضغط في مشغل MP3.

نوعية الصوت	عرض الحزمة	النمط	معدل الضغط
الهاتفي	3KHZ	أحادي Mono	1:96
أفضل من الموجة القصيرة	4.5KHZ	أحادي Mono	1:48
أفضل من معدل AM	7.5KHZ	احادي Mono	1:24
مماثل لمعدل FM	11KHZ	مزدوج Stereo	من 1:24 الى 1:26
قريب من CD	15KHZ	مزدوج Stereo	1:16
CD	فوق 15KHZ	مزدوج Stereo	من 1:12 الى1:14

إذاً تستطيع هيئة MP3أن تضغط الصوت بنسبة 1:12 إلى 1:14، وذلك بضغط حجم ملف الصوت دون الإضرار بجودته بينما يمكن أن تبلغ مساحة القرص التي تستهلكها دقيقة واحدة من ملف الصوت المجرد الأصلي حوالي 10MByte.

4-1-3-تكنولوجيا مشغلات MP3:

تختلف مشغلات MP3 عن مشغل الكاسيت والأقراص الليزرية CD في أنها لا تحتوي على أية قطع ميكانيكية تتحرك، حيث لا توجد تروس أو بكرات أو محرك لإدارة شريط الكاسيت أو CD. حيث تقوم مشغلات MP3بتشغيل ملفات الكترونية بنفس فكرة تشغيل ملفات الحاسوب. وهذا يعد انتقالاً نوعياً في فكرة عمل الأجهزة الصوتية. فمراحل تشغيل ملفاتMP3هي:

1. استدعاء ملف MP3المطلوب من الذاكرة.
2. فك تشفير الملف.
3. تكبير الإشارة الصوتية لتمكين السماعات من إخراج الصوت.

ولأداء هذه المراحل الثلاث فإن جهاز مشغل MP3 يحتوي على مايلي:

1. مدخل للبيانات Data port.
2. ذاكرة Memory.
3. معالج ميكرويMicroprocessor.
4. معالج الإشارة الرقمية (DSP) Digital signal processor.

5. شاشة عرض Display.
6. أزرار التحكم Playback control.
7. مخرج الصوت Audio port.
8. مكبر للصوت Amplifier.
9. وحدة تغذية كهربائية Power supply.

4-2-تقنيةMP3Pro:

هي تقنية صوت متوافقة مع هيئة MP3، ولكنها تستطيع إنشاء ملفات يقل حجمها عن نصف حجم ملفات MP3الأصلية بدون خفض جودتها الأصلية، وكذلك تقليل زمن تنزيل الملفات،أي تتيح لنا أن نخزن على مشغلات الموسيقا الشخصية، أو أن ننشئ أقراصاً مدمجة، تتضمن ضعف ماكان متاحاً سابقاً من ملفات الصوت الرقمي، على الأقل، بدون التضحية بالجودة أو التوافقية.

ملاحظة: قد يلحظ أصحاب الآذان المرهفة فرقاً في جودة الصوت، ولكن بالنسبة لمعظم التطبيقات الشخصية لا يوجد أفضل من هيئة MP3Pro.

4-2-1-ميزةMP3Pro:

إن الطريقة التي تعتمدها هيئة MP3Pro للحفاظ على جودة الصوت ضمن مستويات الضغط المرتفعة هي: تقسيم الإشارة الصوتية، والتعامل بشكل مختلف مع كل من الترددات المنخفضة والمرتفعة. وتتم العملية بضغط قسم الترددات المنخفضة من الإشارة الصوتية (الذي يتراوح بين 0-8KHZ) اعتماداً على هيئة MP3 العادية باستخدام معدل منخفض للبتات. بينما لا يتم فعلياً ضغط قسم الترددات الصوتية المرتفعة من الإشارة الصوتية (الذي يتراوح بين8-16KHZ) ضمن ملف الصوت الناشئ، بل يتم نسخها أو إعادة بنائها وقت تشغيل الملف. ويتم تخزين التعليمات التي تشير إلى كيفية إعادة إنشاء الأقسام المعقدة من الإشارة الصوتية ضمن ملف الصوت ذاته. ثم تعمل مشغلات الموسيقا المتوافقة مع هيئة MP3Pro على فك تشفير هذه الأقسام من الإشارة، ثم وصل الأجزاء وتسمى هذه التقنية "تقنية نسخ الحزمة الطيفية" (Spectral band replication SBR). يستخدم ملف MP3Pro العادي معدل بت يعادل 64Kbps (وهو نصف المعدل المستخدم في ملفات MP3 عالية الجودة). وتكون 94% من البيانات (أي ما يعادل 60Kbps) مشفرة باستخدام هيئة MP3، أما نسبة 6% المتبقية (ما يعادل 4Kbps) فتستخدم لإعادة بناء الإشارات ذات الترددات المرتفعة عند الاستقبال بناء على تقنية نسخ الحزمة الطيفية SBR.

2.2.4 استخدام ملفات MP3Pro:

تتوافق هيئة MP3Pro من الناحية التقنية مع تطبيقات ملفات MP3الموجودة حالياً. ولكن إذا لم يكن المشغل متوافقاً مع هيئة MP3Pro، فسيهمل تشفير SBR الذي تتضمنه البيانات المرمزة حسب هذه الهيئة، مما يؤدي إلى ظهور صوت خالٍ من الترددات المرتفعة، كون المشغل لن يتمكن من قراءة البيانات التي تعبر عن الصوت عالي الترددات. كما قد لا تتمكن مشغلات الأقراص المدمجة من التعرف على البيانات المشفرة حسب تقنية SBR. ولذلك علينا التأكد من قدرة هذه المشغلات على التعرف على تقنية MP3Pro، والحصول على قائمة بالمنتجات التي تدعمها للحصول على كامل المزايا التي توفرها.

5. الصيغ الأخرى المستخدمة في ضغط الصوت:

5-1-صيغةWAV: هي من أول الصيغ المطورة للحواسيب الشخصية. طورت من قبل شركتي IBM ومايكروسوفت مما يجعلها صيغة ذات صدى عالمي. تستخدم صيغة WAV غالباً في تسجيل الصوت الخام(الصوت الأصلي الذي لم تدخل عليه أية تعديلات أو مؤثرات). حيث تستخدم هذه الصيغة لإنتاج العمل وتحريره وهندسته والتعديل عليه، ثم يصدر ويحول إلى ملفات مضغوطة مثل: MP3، وWMA،وRM، وRA.

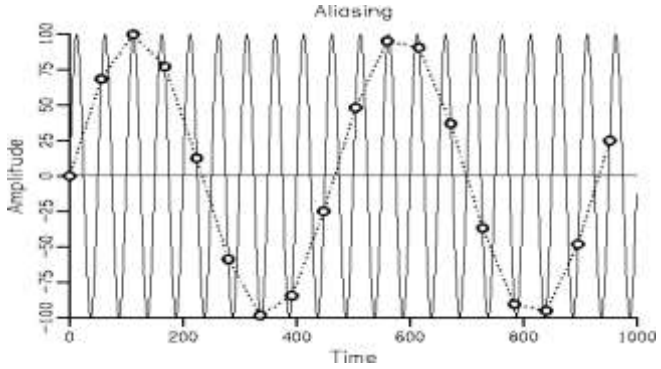
تتميز صيغة WAVبالجودة الفائقة، بالإضافة إلى أن كل البرامج الصوتية تدعم تحريرها وتعديلها. ولكن من جهة أخرى فإن حجمها ضخم جداً، حيث يبلغ متوسط مساحة التخزين 10MB لكل دقيقة. ولذلك فهي غير ملائمة للتداول والنشر على الويب، أو التشغيل على المشغلات الإلكترونية. يمكن ضغطها لتقليل حجمها ولكنها تفقد معظم جودتها[2].

5-2-صيغة(WMAWindows Media Audio): حجمها مقبول وأعلى جودة وأقل حجم من MP3. ولكن المشغلات الإلكترونية القديمة لاتدعمها، ولا حتى جوالات نوكيا. والبرامج الصوتية المحترفة لا تدعم تحريرها مباشرة، فتحتاج لتحويلها إلى WAV أولاً [3] .

5-3-صيغة:(AAC(Advanced Audio Coding تم طرح AAC من قبل شركة Apple، وهي تفضل تسميته MP4 لجعل الناس تعتقد أنه أفضل من MP3 عند رؤيتهم الرقم 4. وهي ببساطة تنسيقات MP3 خالية من العيوب، ولكنها في الوقت نفسه تفتقد للدقة التي تجعل MP3هي الأفضل[2].

وهناك أيضاً صيغ أخرى مثل صيغة (RM(Real Media، وصيغة(RA(Real Audio،وهما تتبعان لشركة REAL. وصيغة (RAM(Real Audio Presentation، وصيغة Ogg Vorbis. وهذه الصيغ تعتبر مناسبة في الحجم، ولكن البرامج الصوتية لا تدعم تحريرها وتعديلها.

5-4-ملفات الصوت WAV: هو الملف الذي يحوي عينات صوتية مسجلة. أما كيفية تسجيل الصوت في هذا الملف فتتم كما يلي: يتم إصدار الصوت أمام ميكروفون لتحويله إلى إشارة تشابهية، وهذا الميكروفون يكون مربوطاً مع بطاقة الصوت المركبة في الحاسوب. تفحص بطاقة الصوت الإشارة المستقبلة بشكل دوري، فمثلاً تكون الإشارة المستقبلة في لحظة ما مساوية للصفر، وبعد فترة قصيرة يأخذ مطال الإشارة المستقبلة قيمة أخرى. يتم تسجيل هذه القيمة وهي قيمة العينة Sample. تستمر عملية فحص الإشارات الواردة وأخذ العينات حتى آخر المقطوعة الموسيقية المراد تسجيلها بشكل رقمي، فنحصل من ذلك على مجموعة من العينات، وهذه العينات تسجل في ملف الصوت WAV. الآن من أجل إصدار الصوت المسجل في أحد ملفات الصوت، يجب إرسال العينات من هذا الملف إلى المكبر عن طريق بطاقة الصوت.



الشكل (4): كيفية أخذ العينات من الإشارة الصوتية.

تتناسب جودة الصوت المسجل في ملف WAV مع معدل أخذ العينات (عدد العينات المأخوذة في الثانية). يحدد معدل أخذ العينات القياسي بالقيم: (11025SPS،22050SPS، 44100SPS). ويبين الشكل (4) كيفية أخذ العينات من الإشارة.ويشترط من أجل الحصول على عملية تقطيع صحيحة (أي حتى يمكن استعادة الإشارة التشابهية من الرقمية)، أن يتحقق شرط نايكويست الذي ينص: "يمكن تقطيع الإشارة التشابهية بشكل صحيح، فقط إذا لم تكن تحتوي على مركبات ترددية أعلى من نصف معدل التقطيع"[6].

النتائج والمناقشة:

كنتيجة لهذا البحثورد جدولاً يتم فيه المقارنة بين خوارزميات ضغط الصوت مبرزين مميزات كل منها وعيوبها من حيث دقة الضغط، وجودة الصوت، وملاءمتها للأجهزة الإلكترونية، ودعم البرامج الصوتية وتحريرها وتعديلها.أما ما يخص التطبيق العملي على هذا البحث، فقد تضمن أمثلة عملية تم من خلالها نمذجة إشارات صوتية وتحليلها باستخدام طرق برمجية وأخرى رياضية عن طريق استخدام برنامج MATLAB[7]، والذي يعتبر برنامجاً مساعداً جداً في عملية تحليل الإشارة الصوتية والموسيقية.

الجدول (2): مقارنة بين خوارزميات ضغط الصوت .

الخوارزمية	دقة الضغط	جودة الصوت	الحجم	دعم المشغلات الالكترونية	دعم البرامج الصوتية وتعديلها وتحريرها
WAV	يمكن ضغطها ولكن تفقد معظم الجودة	جودة فائقة، أعلى الصيغ جودة	ضخم جداً	غير ملائمة بسبب ضخامة الحجم	البرامج الصوتية تدعمها
MP3	الحجم مقبول	الجودة مقبولة (غير راقية لدرجة كبيرة	مقبول	أكثر الصيغ دعماً	كل البرامج تدعمها
MP3Pro	تضغط ضعف ضغط MP3	تعطي نفس جودة الأصل	صغير جداً	لا تدعمهاكل المشغلات	لا تدعمها كل البرامج
WMA	الضغط مقبول	أعلى جودة وأقل تشويه من MP3	الحجم مقبول (مساو تقريباً ل MP3)	المشغلات القديمة لا تدعمها	البرامج المحترفة لا تدعمها
RMA,RM,RA	الضغط مقبول	الجودة منخفضة	مناسبة بالحجم	مناسبة لأجهزة الجوال والأجهزة البسيطة عموماً	لا تدعم تحريرها وتعديلها

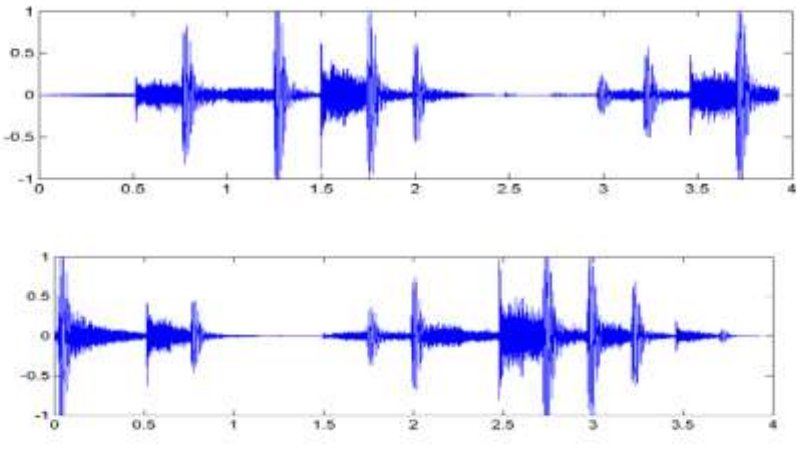
تحليل وتمثيل إشارة كلامية: تم عرض الكود البرمجي المستخدم في تحليل الإشارة الكلامية"Sunday" باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB.

الكود البرمجي المستخدم في تحليل الإشارة الكلامية"Sunday"باستخدام برنامج المحاكاةMATLAB:

```
%%[y, fs, nbits]=wavReadInt('sunday.wav');
subplot(2,1,1)
time=(1:length(y))/fs;
plot(time, y); axis([min(time), max(time), -2^nbits/2, 2^nbits/2]);
xlabel('Time (seconds)'); ylabel('Amplitude'); title('Waveforms of "sunday"');
 frameSize=512;
index1=0.606*fs;
index2=index1+frameSize-1;
line(time(index1)*[1, 1], 2^nbits/2*[-1 1], 'color', 'r');
line(time(index2)*[1, 1], 2^nbits/2*[-1 1], 'color', 'r');
subplot(2,1,2);
time2=time(index1:index2);
y2=y(index1:index2);
plot(time2, y2, '.-'); axis([min(time2), max(time2), -2^nbits/2, 2^nbits/2]);
xlabel('Time (seconds)'); ylabel('Amplitude'); title('Waveforms of the voiced "ay" in "sunday"');
waveFile='sunday.wav';
frameSize=256;
overlap=128;
 [y, fs, nbits]=wavReadInt(waveFile);
fprintf('Length of %s is %g sec.\n', waveFile, length(y)/fs);
frameMat=buffer(y, frameSize, overlap);
frameNum=size(frameMat, 2);
volume1=zeros(frameNum, 1);
volume2=zeros(frameNum, 1);
for i=1:frameNum
    frame=frameMat(:,i);
    frame=frame-mean(frame);        % zero-justified
    volume1(i)=sum(abs(frame));     % method 1
    volume2(i)=10*log10(sum(frame.^2)); % method 2
end
time=(1:length(y))/fs;
frameTime=((0:frameNum-1)*(frameSize-overlap)+0.5*frameSize)/fs;
subplot(3,1,1); plot(time, y); ylabel(waveFile);
subplot(3,1,2); plot(frameTime, volume1, '.-'); ylabel('Volume (Abs. sum)');
subplot(3,1,3); plot(frameTime, volume2, '.-'); ylabel('Volume (Decibels)'); xlabel('Time (sec)');
```

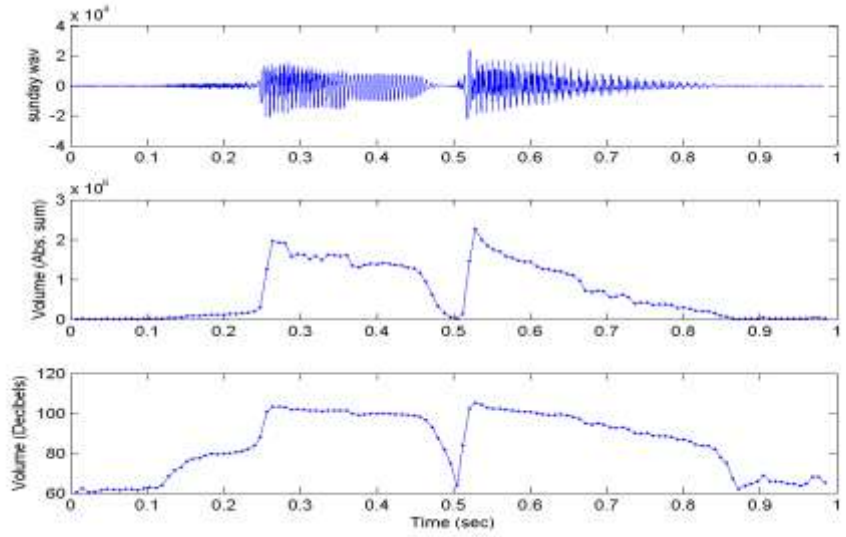
من خلال تحليل الإشارة نتج لدينا مايلي:

1. قراءة وعرض المقطع الصوتي وعرض المنحنيات الناتجة عن السماعة أو القناة اليمنى واليسرى والمبينة في الشكل (5).



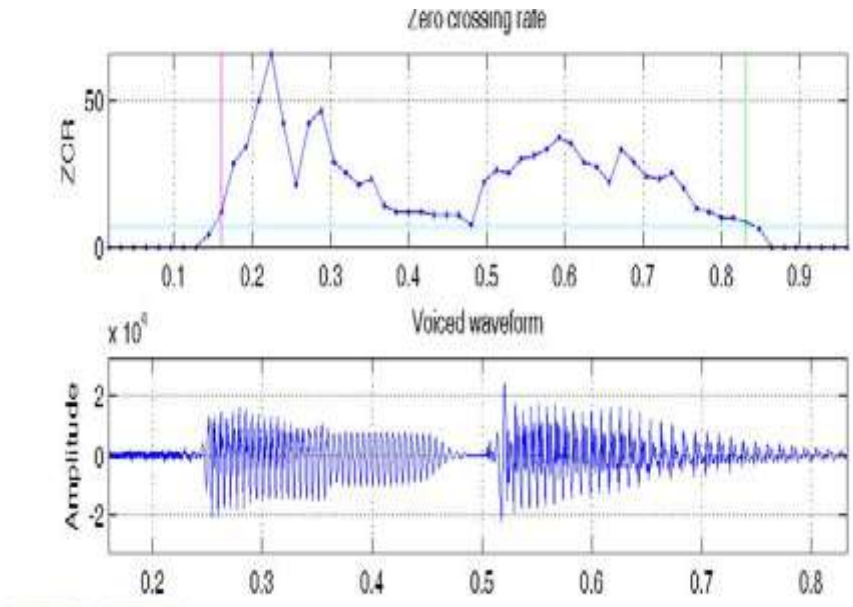
الشكل (5): يبين المنحني الناتج عن القناة اليسرى (a) والقناة اليمنى (b).

2. التعرف على خواص الصوت (Volume) أو (Loudness)الذي يعبر عن شدة الصوت مقاسة بالديسيبل مرة وب Abs.sum مرة أخرى، وتتعلق بمواصفات الميكروفون ومستوى التردد الذي يسمعه الانسان والمبين في الشكل(6).



الشكل (6): يبين شكل موجة "Sunday"، وشدة الصوت مقاسة ب Abs.sumمرة وبالديسيبل مرة أخرى.

3. خاصية فصل الاشارات الصوتية عن الضجيج وهذه الخاصية هي (Zero-crossing rate (ZCR) وتعتمد على عدد المرات التي يصل اليها المنحني الى قيمة الصفر ديسبل فكلما زاد عدد المرات التي اقتربت فيها الاشارة من الصفر تكون الاشارة عندها هي ضجيج كما يوضح الشكل(7).



الشكل (7): يبين خاصية ZCR للإشارة الكلامية "Sunday".

4. تحليل الصوت الى النغمة الاساسية له Pitchوهي خاصية مهمة للإشارات الصوتية وخاصة الإشارات شبه الدورية كإشارة كلام الانسان، والغناء، والعزف الفردي على معظم الآلات الموسيقية. وتحدد النغمة تردد اهتزازات المصدر الصوتي ويمكن اعتبارها التردد الاساسي للصوت الذي يتكرر على كامل الاشارة الصوتية، وحالما يتم التعرف عليها يمكن أن تستخدم في تطبيقات واسعة.

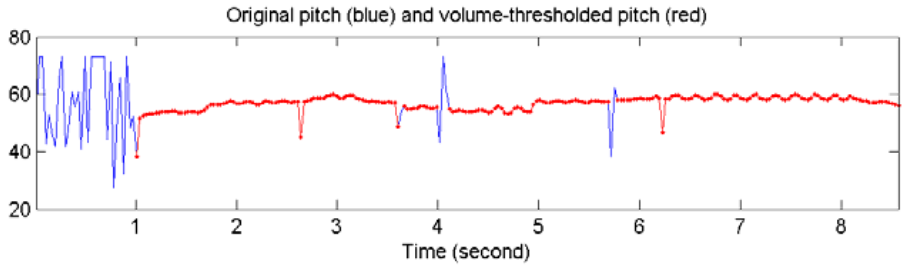
تم عرض الكود البرمجي في إيجاد النغمة الأساسية للإشارة الكلامية "Sunday" والذي يسمى PitchTracking.

الكود البرمجي Pitch Trackingلإيجاد النغمة الأساسية للإشارة الكلامية "Sunday".

Input file pitchTracking/frame2amdf02.m

```
waveFile='sunday.wav';
[y, fs, nbits]=wavread(waveFile);
index1=9000;
frameSize=512;
index2=index1+frameSize-1;
frame=y(index1:index2);
maxShift=length(frame);
plotOpt=1;
method=2;
frame2amdf(frame, maxShift, method, plotOpt);
```

ويوضح الشكل (8) تحليل النغمة الأساسية للإشارة الكلامية "Sunday" حيث تظهر النغمة الأساسية باللون الأزرق.



الشكل(8): يبينتحليل النغمة الأساسية Pitch للإشارة الكلامية "Sunday".

الاستنتاجات والتوصيات:

نحن نوصي عند اختيار صيغة الخوارزمية المناسبة لضغط الصوت بما يلي: نحتاج في البداية لتسجيل الصوت بصيغة WAV، وبعد إكمال العمليات الفنية عليه نقوم بتحويله إما إلى صيغة MP3 أو إلى WMA، (هذا رأي شخصي فقط وليس قاعدة). إذاً ننصح في البداية بتقنية MP3 لأنها أعلى جودة مضغوطة، وحجمها ملائم، وتعمل على معظم الأجهزة والمشغلات. بعد MP3 ننصح بأيّة صيغة من صيغ REAL فهي مناسبة لأجهزة الجوال والأجهزة البسيطة عموماً، وجودتها مقبولة مقارنةً بحجمها الصغير.

إذاً:WAVللإنتاج الصوتي والتسجيل الخام.

MP3للاستماع بجودة عالية.

RM, RA, RAM للجودة المنخفضة.

المراجع

1. MUSMANN, H, G. "*Genesis of the MP3 Audio Coding Standard*". Transactions on Consumer Electronics. IEEE, 2006.

2. DEHERY, Y, F. "*MUSICAM Source Coding*". AES 10th International Conference. Kensington, London, England. 1991.

3. GLOVER, I; GRANT, P. "*Digital Communications*". University of Bradford, University of Edinburgh. Prentice Hall.

4. HAHN, B; VALENTINE, D.T. "*Essential Matlab for engineers and scientists*". Third edition.

5. DELLER, PROAKIS, HANSEN. *"Discrete-Time Processing of Speech Signals"*, Prentice Hall, 1993.

6. RABINER, L; JUANG, B.H. *"Fundamentals of Speech Recognition"*, Prentice Hall, 1993.

7. AGHVAMI, H. "*Digital Modulation Techniques for Mobile and Personal Communication Systems*". Electronics and Communication Engineering Journal, 1993.

8. ALARD, M; LASSALLE, R. *"Principles of Modulation and Channel Coding for Digital Broadcasting for Mobile Receivers"*. EBU Collected Papers on Sound Broadcast into the 21st Century. 1988.

9. ALEXANDER, S.B. *"Optical Communications:Receiver Designs"*. IEE, London, 1997.

10. BRACEWELL, R. *"The Fourier Transform and its Application"*. McGraw-Hill, 1975.

11. BRIGHAM, E.O. *"The Fast Fourier Transform and Applications"*. Prentice Hall, 1988

12. FLETCHER, H; MUNSON, W.A.,*" Loudness, its definition measurement and calculation*", Journal of the Acoustical Society of America, **5**, 82–108 (1993)

13. ROBINSON, D.W; DADSON, R.S.,*" A re-determinationof the equal loudness relations for pure tones"*, British Journalof Applied Physics, **7**, 166–181 (1956).

Sound"._14. BATEAU, D.W., "*Characteristics of human localization of*

Contract No. 123-(60530)23545A, Naval Ordnance Test Station (1961).

15. BARTLETT, B; HOWARD, *"Introduction to Professional Recording Techniques"*. W. Sams & Co., Indianapolis. 1987.

16. GERSHENFELD; NAIL. "*The Nature of Mathematical Modeling"*. Cambridge University, Cambridge, England. 1998.

17. VIBERG, "*Complement on Digital Spectral Analysis and Optimal Filtering*: *Theoryand Exercises*". Course notes for MVE 135, Aug. 2008.