التوصيـــة ITU-R BS.1770

خوارزميات لقياس ارتفاع الصوت لبرنامج سمعي وسوية سمع الذروة الحقيقية

(المسألة ITU-R 2/6)

(2006)

مجال التطبيق

تحدد هذه التوصية خوارزميات قياس السمع لغرض تحديد ارتفاع صوت برنامج ذاتي، وسوية إشارة ذروة حقيقية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن تقنيات إرسال الصوت الرقمية الحديثة تقدم مدى دينامي واسع إلى حد كبير؛

ب) أن التقنيات الرقمية الحديثة لإنتاج وإرسال الصوت توفر مزيجاً من الأشكال الأحادية والمجسمة ومتعددة القنوات وأن برامج الصوت تُنتج بجميع هذه الأشكال؛

ج) أن المستمعين يرغبون في أن يكون ارتفاع الصوت الذاتي للبرامج السمعية منتظماً بالنسبة لمصادر وأنواع برامج متباينة؛

د) أن هناك طرائق عديدة لقياس سويات السمع غير أن طرائق القياس الحالية المستعملة في إنتاج البرامج لا توفر مؤشراً بشأن الارتفاع الذاتي للصوت؛

هـ) أنه، لغرض تبادل البرامج، من الضروري توفر خوارزمية وحيدة موصى بها للتقدير الموضوعي لارتفاع الصوت الذاتي؛

و) أن الخوارزميات المعقدة المستقبلية المستندة إلى نماذج صوتية نفسية قد توفر قياسات موضوعية محسنة لارتفاع الصوت لأنواع متعددة من البرامج السمعية؛

ز) أنه ينبغي تفادي الحمولة الزائدة المفاجئة للوسائط الرقمية، بل وينبغي حتى تفادي الحمولة الزائدة الخاطفة لهذه الوسائط؛

وإذ تضع في اعتبارها كذلك

ح) أن مستويات إشارة الذروة قد تزداد بسبب العمليات المطبقة على نحو شائع مثل الترشيح أو خفض معدل البتات؛

ط) أن تقنيات القياس الموجودة لا تعكس سوية الذروة الحقيقية داخل إشارة رقمية حيث إن قيمة الذروة الحقيقية قد تقع بين عينات؛

ي) أن عملية معالجة الإشارة الرقمية تجعل من العملي تطبيق خوارزمية تقدر على نحو دقيق سوية الذروة الحقيقية لأية إشارة؛

ك) أن استعمال خوارزمية تدل على الذروة الحقيقية سيتيح الحصول على مؤشر دقيق لارتفاع السقف بين سوية ذروة إشارة سمعية رقمية وسوية التقليم؛

توصي

1 بأنه ينبغي استعمال الخوارزمية المحددة في الملحق 1 عند الحاجة إلى قياس موضوعي لارتفاع صوت قناة أو برنامج سمعي من أجل تسهيل تقديم البرامج وتبادلها؛

2 بأن الطرائق المستعملة في إنتاج البرامج وما بعد الإنتاج للدلالة على ارتفاع صوت البرنامج يمكن أن تستند إلى الخوارزمية المحددة في الملحق 1؛

3 بأنه عند الحاجة إلى مؤشر لسوية ذروة حقيقية لإشارة سمعية رقمية، ينبغي لطريقة القياس أن تستند إلى المبادئ التوجيهية الواردة في الملحق 2، أو إلى طريقة تفضي إلى نتائج مشابهة أو أفضل؛

الملاحظة 1 – ينبغي للمستعملين أن يدركوا أن ارتفاع الصوت المقاس هو تقدير لعلو الصوت الذاتي يشتمل على درجة ما من التناقض تبعاً للمستمعين والمواد السمعية وظروف الاستماع؛

توصي كذلك

1 بأنه ينبغي القيام بعمل إضافي لتمديد الخوارزمية المحددة في الملحق 1 كي توفر مؤشراً لارتفاع الصوت قصير المدى؛

2 بأنه ينبغي النظر في الحاجة المحتملة لتحديث هذه التوصية في حالة ظهور خوارزميات ارتفاع صوت جديدة توفر أداءً محسّناً عما توفره الخوارزمية المحددة في الملحق 1.

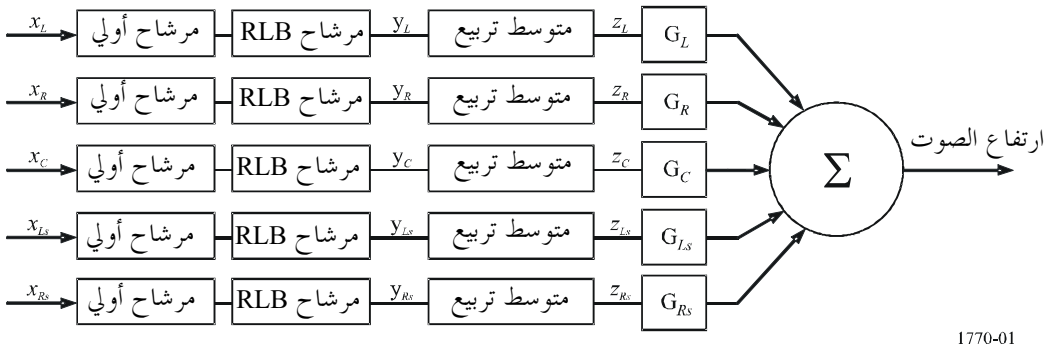
الملحق 1

مواصفات خوارزمية لقياس موضوعي لارتفاع الصوت متعدد القنوات

يتناول هذا الملحق خوارزمية لقياس ارتفاع الصوت متعدد القنوات. ويبيّن الشكل 1 مخطط إجمالي للأجزاء المختلفة للخوارزمية. ووضعت إشارات التمييز عند نقاط مختلفة في مسير تدفق الإشارة للمساعدة في وصف الخوارزمية. ويبين المخطط الإجمالي مدخلات لخمس قنوات رئيسية (يسار، وسط، يمين، محيط يسار، محيط يمين)، مما يسمح بمراقبة البرامج التي تحتوي من قناة واحدة إلى خمس قنوات. وقد لا تستخدم بعض المدخلات بالنسبة لبرنامج يحتوي على أقل من خمس قنوات. ولا يتضمن القياس قناة لتأثيرات التردد المنخفض (LFE).

الشكل 1

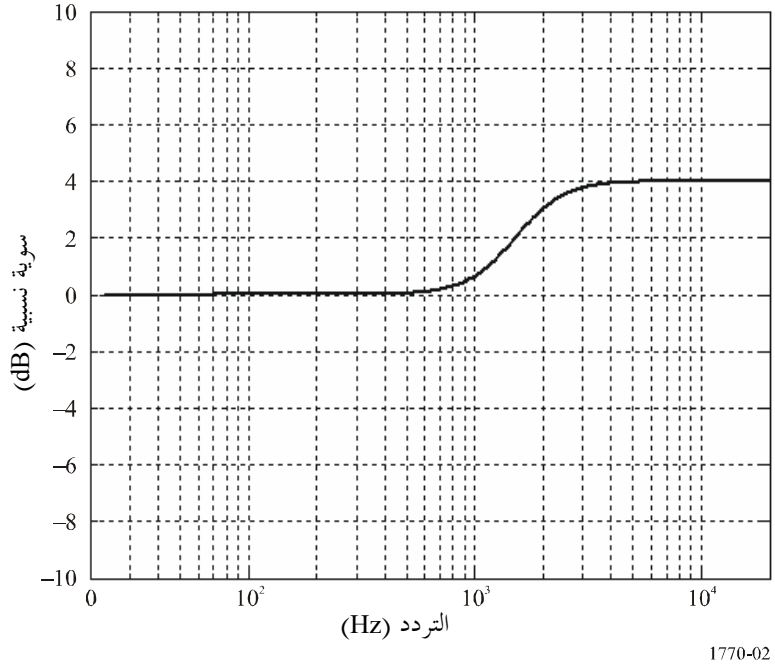
مخطط إجمالي لخوارزمية ارتفاع صوت متعدد القنوات



وتطبق المرحلة الأولى من الخوارزمية ترشيحاً أولياً على الإشارة قبل إجراء LEQ(RLB) كما هو موضح في الشكل 2. والمستهدف من الترشيح الأولي هو التأثيرات الصوتية للرأس المغناطيسية حيث يتم نمذجة الرأس هنا باعتبارها كرة مصمتة.

الشكل 2

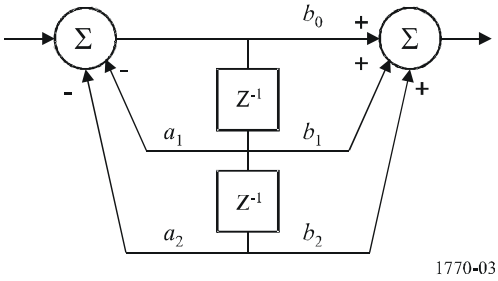
استجابة المرشاح الأولي المستعمل في تناول التأثيرات الصوتية للرأس المغناطيسية



يُحدد المرشاح الأولي بواسطة المرشاح الموضح في الشكل 3 بالمعاملات المحددة في الجدول 1.

الشكل 3

رسم بياني لتدفق الإشارة على اعتبار أنه مرشاح من الدرجة الثانية



الجدول 1

معاملات مرشاح للمرشاح الأولي لنمذجة رأس كروي

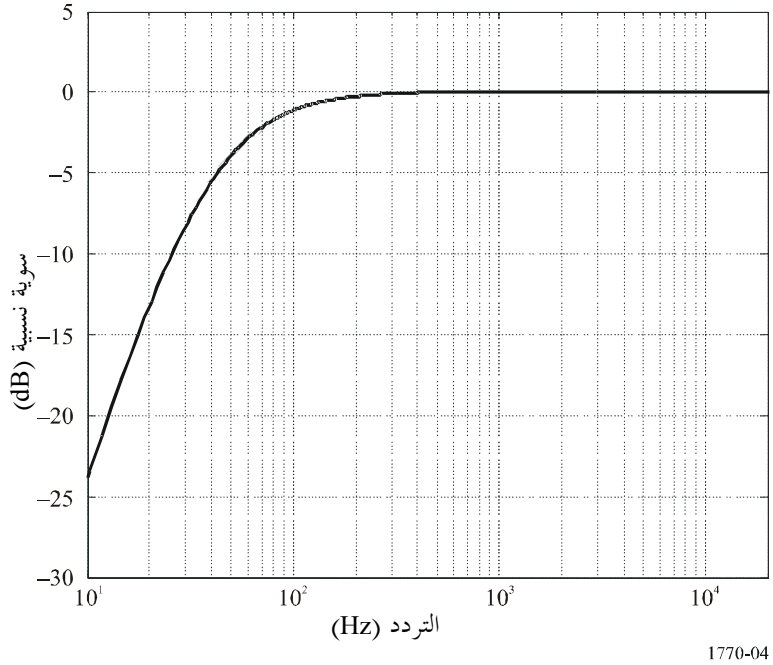
1,53512485958697	b_0		
2,69169618940638–	b_1	1,69065929318241–	a_1
1,19839281085285	b_2	0,73248077421585	a_2

وتخصص معاملات المرشاح هذه لمعدّل عيّنات قدره 48 KHz. وستحتاج التطبيقات عند معدلات عينات أخرى إلى قيم معاملات مختلفة، حيث ينبغي انتقاؤها لتوفير نفس الاستجابة الترددية التي يوفرها المرشاح المحدد عند المعدّل 48 KHz. وقد تتطلب قيم هذه المعاملات أن تُثبت كميتها طبقاً للدقة الداخلية للأجهزة المتوفرة. وأظهرت الاختبارات أن أداء الخوارزمية لا يتأثّر من جرّاء التغيرات الصغيرة في هذه المعاملات.

وتطبق المرحلة الثانية من الخوارزمية منحنى الترجيح RLB، الذي يتكوّن من مرشاح بسيط لتمرير الترددات العالية كما موضح في الشكل 4.

الشكل 4

منحنى الترجيح RLB



حُدد منحنى الترجيح RLB بوصفه مرشاحاً من الدرجة الثانية كما هو موضح بالشكل 3، بالمعاملات المحددة في الجدول 2.

الجدول 2

معاملات مرشاح لمنحنى الترجيح RLB

1,0	b_0		
2,0–	b_1	1,99004745483398–	a_1
1,0	b_2	0,99007225036621	a_2

وتخصص معاملات المرشاح هذه لمعدّل عينات قدره 48 KHz. وستحتاج التطبيقات عند معدلات عينات أخرى إلى قيم معاملات مختلفة، حيث ينبغي انتقاؤها لتوفير نفس الاستجابة الترددية التي يوفرها المرشاح المحدد عند المعدّل 48 KHz.

وبتطبيق المرشاح الأولي وترشيح RLB، يُقاس متوسط تربيع الطاقة في فترة القياس T على النحو التالي:

$$z_i = \frac{1}{T}\int_0^T y_i^2 dt \tag{1}$$

حيث y_i تمثل إشارة المدخل المترشحة بواسطة المرشاح الأولي لنمذجة تأثيرات الرأس ومنحنى الترجيح RLB، على حد سواء. ($i = L$، R، C، Ls، Rs، N حيث تمثل N عدد القنوات).

وحالما تُحسب سوية متوسط التربيع المرجح لكل قناة، z_i ، تكون الخطوة الأخيرة جمع القنوات N على النحو التالي:

$$\text{Loudness} = -0.691 + 10\log_{10}\sum_i^N G_i \cdot z_i \quad \text{dB} \tag{2}$$

إذا كانت موجة جيب 0 dBfs 1 kHz تمثل مدخلاً لمدخل القناة يسار أو وسط أو يمين، فإن ارتفاع الصوت المستدل عليه سيساوي –3,00 dB.

ترد معاملات الترجيح للقنوات المختلفة في الجدول 3.

الجدول 3

معاملات ترجيح القنوات السمعية الفردية

القناة	الترجيح، G_i
يسار (G_L)	1,0 (0 dB)
يمين (G_R)	1,0 (0 dB)
وسط (G_C)	1,0 (0 dB)
محيط اليسار (G_{Ls})	1,41 (1,5 dB + ~)
محيط اليمين (G_{Rs})	1,41 (1,5 dB + ~)

تجدر الملاحظة أنه بينما أظهرت هذه الخوارزمية فاعلية عند استعمالها في برامج سمعية مخصصة للمحتوى الإذاعي على نحو نموذجي، لا تعد الخوارزمية بصورة عامة ملائمة للاستعمال لتقدير ارتفاع الصوت الذاتي للنغمات الصافية.

التذييـــل 1
للملحـــق 1

وصف وإعداد خوارزمية قياس متعدد القنوات

يصف التذييل خوارزمية وضعت حديثاً لقياس موضوعي لارتفاع الصوت المدرك للإشارات السمعية. ومن الممكن استعمال الخوارزمية لإجراء قياس دقيق لإشارات أحادية ومجسمة ومتعددة القنوات. ويعد التبسيط واحداً من المزايا الرئيسية للخوارزمية المقترحة إذ يتيح تنفيذها بتكلفة منخفضة جداً. ويصف هذا التذييل أيضاً نتائج الاختبارات الذاتية المنهجية التي أجريت لتشكل قاعدة بيانات ذاتية استعملت لتقييم أداء الخوارزمية.

1 مقدمة

هناك تطبيقات عديدة يكون فيها من الضروري إجراء القياس والتحكم بارتفاع الصوت المدرك للإشارات السمعية. وتشمل الأمثلة على هذه التطبيقات البث الراديوي والتلفزيوني حيث تتغير طبيعة ومحتوى المواد السمعية على نحو متكرر. وبمقدور المحتوى السمعي لهذه التطبيقات أن يتحول على نحو متواصل بين الموسيقى والكلام والتأثيرات الصوتية أو ثمة مزيج من هذه الأشكال. ومن شأن مثل هذه التغييرات في محتوى مواد البرنامج أن تفضي إلى تغييرات مهمة في ارتفاع الصوت الذاتي. كما أن أشكالاً عديدة من معالجة الديناميات تطبق على نحو متكرر على الإشارات مما قد ينتج عنه تأثير ملحوظ على ارتفاع الصوت المدرك للإشارة. وبطبيعة الحال، تكتسب مسألة ارتفاع الصوت الذاتي أيضاً أهمية كبيرة بالنسبة للصناعة الموسيقية حيث تستعمل معالجة الديناميات على نحو شائع للحصول على الحد الأقصى لارتفاع الصوت المدرك للتسجيل.

لقد بذلت خلال السنوات الأخيرة جهود متواصلة داخل فرقة العمل 6P التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية لتحديد طريقة موضوعية لقياس ارتفاع الصوت المدرك لمادة برنامج نموذجي لتطبيقات إذاعية. وقد أنصبت المرحلة الأولى من جهود قطاع

الاتصالات الراديوية على دراسة خوارزميات موضوعية لارتفاع صوت أحادي على نحو حصري، وقياس متوسط التربيع المرجح، (RLB)*Leq*، وبرهنت على أنها توفر أفضل أداء للإشارات أحادية الصوت [Soulodre، 2004].

من المسلَّم به إلى حدٍّ بعيد، أن جهازاً لقياس ارتفاع الصوت يمكن تشغيله على الإشارات الأحادية والمجسمة ومتعددة القنوات ضروري للتطبيقات الإذاعية. وتعرض الوثيقة الحالية خوارزمية قياس جديدة لارتفاع الصوت يمكن أن تعمل على نحو ناجح في الإشارات السمعية الأحادية والمجسمة ومتعددة القنوات. وتستند الخوارزمية المعروضة إلى تمديد مباشر لخوارزمية (RLB)*Leq*. وبالإضافة إلى ما تقدم تمتلك الخوارزمية المتعددة القنوات الجديدة التعقيد الحسابي المنخفض جداً للخوارزمية أحادية الصوت (RLB)*Leq*.

2 معلومات أساسية

وُضعت في المرحلة الأولى من دراسة قطاع الاتصالات الراديوية طريقة اختبار ذاتية لدراسة مفهوم ارتفاع الصوت لمواد برنامج أحادي الصوت نموذجي [Soulodre، 2004]. وأُجريت تجارب ذاتية في خمسة مواقع في العالم لوضع قاعدة بيانات ذاتية لتقييم أداء خوارزميات قياس ارتفاع صوت المحتملة. كما جرت مواءمة ارتفاع صوت لسلاسل سمعية أحادية الصوت مختلفة مع سلسلة مرجعية. وتم الحصول على السلاسل السمعية من مواد إذاعية فعلية (تلفزيون وراديو).

وبالاقتران مع هذه الاختبارات، قُدم ما مجموعه عشر خوارزميات/أجهزة قياس لارتفاع الصوت أحادية الصوت معدة تجارياً من قبل سبع جهات مختلفة بغرض تقييمها في مختبر الإدراك السمعي التابع لمركز بحوث الاتصالات في كندا.

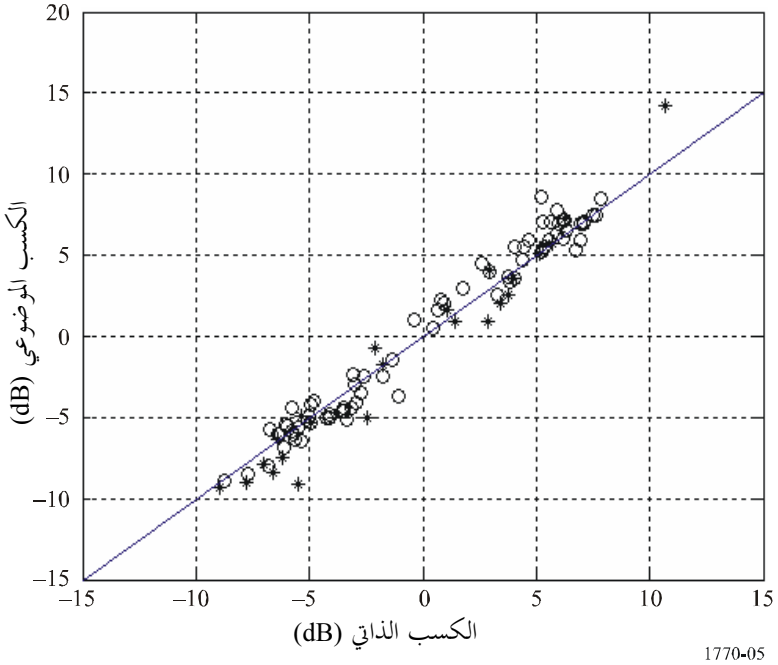
وبالإضافة إلى ما تقدم، فقد ساهم Soulodre بخوارزميتين أساسيتين إضافيتين لارتفاع الصوت لاستخدامهما كخط أساس للأداء. [Soulodre، 2004] ويكون هذان القياسان الموضوعيان من دالة ترجيح ترددي بسيطة، يعقبها وحدة قياس متوسط التربيع. ويستعمل واحد من جهازي القياس، (RLB)*Leq*، منحنى ترجيح لتمرير الترددات العالية يشار إليه بوصفه المنحني B- المعدل للترددات المنخفضة (RLB).

أما القياس الآخر، *Leq*، فهو ببساطة بمثابة قياس غير مرجح لمتوسط التربيع.

ويظهر الشكل 5 نتائج دارسة قطاع الاتصالات الراديوية الأولية لجهاز قياس ارتفاع صوت (RLB)*Leq*. ويشير المحور الأفقي إلى ارتفاع الصوت الذاتي ذي الصلة المشتق من قاعدة البيانات الذاتية، بينما يشير المحور الرأسي الى ارتفاع الصوت المتوقع لجهاز قياس (RLB)*Leq*. وتمثل كل نقطة في الرسم البياني نتيجة لواحدة من سلاسل الاختبار الصوتية في الاختبار. أما الدوائر المفتوحة فهي تمثل سلاسل صوتية كلامية، بينما تمثل النجوم سلاسل صوتية غير كلامية. ومن الممكن ملاحظة أن نقاط البيانات متجمعة على نحو متقارب حول القطر بما يشير إلى الأداء الممتاز لجهاز القياس (RLB)*Leq*.

الشكل 5

جهاز قياس ارتفاع الصوت (RLB) *Leq* أحادي الصوت
مقابل النتائج الذاتية (r = 0,982)



كما اتضح أن جهاز *Leq*(RLB) يوفر الأداء الأفضل مقارنة بجميع أجهزة القياس التي جرى تقييمها (على الرغم من أنه، في إطار الأهمية الإحصائية، كان أداء بعض أجهزة القياس الصوتية النفسية بالمستوى ذاته). ووُجد أن أداء جهاز قياس *Leq* بنفس كفاءة جهاز قياس (RLB) تقريباً. وتدل هذه النتائج على أنه إذا تعلق الأمر بمادة إذاعية أحادية الصوت نموذجية، فإن جهاز قياس بسيط لارتفاع الصوت مستند إلى الطاقة يعد بالمثل فعّالاً مقارنة بوسائل قياس أكثر تعقيداً قد تتضمن نماذج إدراكية مفصلة.

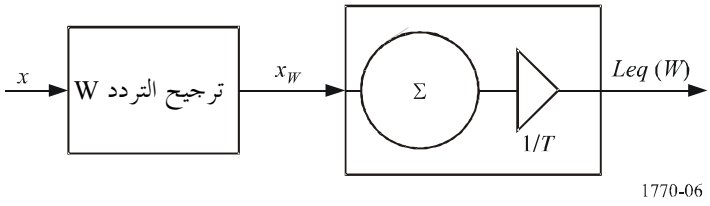
3 تصميم خوارزمية *Leq* (RLB)

صُممت خوارزمية ارتفاع الصوت *Leq*(RLB) على نحو محدد بحيث تكون سهلة جداً. ويظهر الشكل 6 مخططاً إجمالياً للخوارزمية المذكورة أعلاه. ويتكون المخطط من مرشاح لتمرير الترددات العالية يعقبه وسيلة لتوسيط الطاقة مع الوقت. ويذهب خرج المرشاح إلى وحدة معالجة تجمع الطاقة وتحسب المتوسط خلال الوقت.

والغرض من المرشاح هو توفير بعض الترجيح نسبة إلى الإدراك الحسي للمحتوى الطيفي للإشارة. ومن مزايا استعمال هذا الهيكل الأساسي لقياسات ارتفاع الصوت أنه يمكن إجراء المعالجة بأكملها بواسطة وحدات زمنية بسيطة بمتطلبات حسابية منخفضة جداً.

الشكل 6

مخطط إجمالي لقياسات ارتفاع صوت بسيطة مستندة إلى الطاقة



وتعد خوارزمية *Leq*(RLB) الموضحة في الشكل 6 مجرد نسخة تردد مرجح لقياس *سوية صوت مكافئة* (*Leq*). وتعرف سوية *Leq* على النحو التالي:

$$Leq(W) = 10 \log_{10}\left[\frac{1}{T}\int_0^T \frac{x_W^2}{x_{Ref}^2}\,\mathrm{d}t\right] \quad \text{dB} \tag{3}$$

حيث:

x_W: الإشارة عند خرج مرشاح الترجيح

x_{Ref}: بعض السويات المرجعية

T: طول السلسلة السمعية.

ويمثل الرمز W في سوية $Leq(W)$ ترجيح التردد، وهو في هذه الحالة المنحني المعدل–B للترددات المنخفضة (RLB).

4 اختبارات ذاتية

لتقييم أدوات قياس ارتفاع صوت متعدد القنوات، كان من الضروري إجراء اختبارات ذاتية منهجية لإنشاء قاعدة بيانات ذاتية. ومن الممكن حينئذ تقييم خوارزميات قياس ارتفاع الصوت المحتملة في مجال قدرتها على توقع نتائج الاختبارات الذاتية. وقد وفرت قاعدة البيانات تقديرات ارتفاع صوت مُدركة لأنواع متعددة من مواد برامج أحادية ومجسمة ومتعددة القنوات. وكانت مواد البرامج المستعملة في الاختبارات قد أخذت من برامج تلفزيونية وراديوية فعلية أذيعت في أرجاء متعددة من العالم، فضلاً عن تلك البرامج المأخوذة من الأقراص المدمجة CDs ومن الأقراص الفيديوية الرقمية DVDs. وتضمنت السلاسل مسرحيات موسيقية وتلفزيونية وسينمائية وأحداث رياضية ونشرات إخبارية ومؤثرات صوتية وإعلانات. كما تضمنت السلاسل مقاطع صوتية بلغات متعددة.

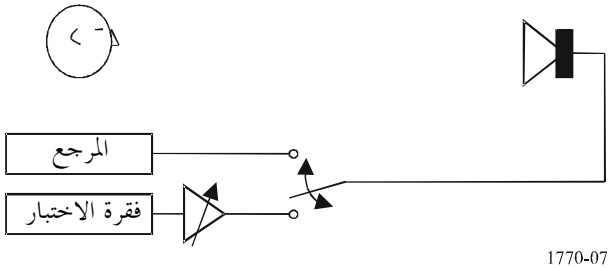
1.4 إعداد الاختبار الذاتي

تتكون الاختبارات الذاتية من عملية مواءمة لارتفاع الصوت. وقام المعنيون بالاستماع إلى نطاق واسع من مواد برامج نموذجية وقاموا بضبط سوية كل فقرة من فقرات الاختبار حتى تطابق ارتفاع الصوت المُدرك مع الإشارة المرجعية (انظر الشكل 7).

وكانت الإشارة المرجعية قد استنسخت على الأغلب عند سوية قدرها 60 dBA، وهي السوية التي وجد (بنيامين) أنها سوية الاستماع النموذجية لمشاهدة التلفزيون في البيوت العادية [Benjamin، 2004].

الشكل 7

منهجية اختبار ذاتية



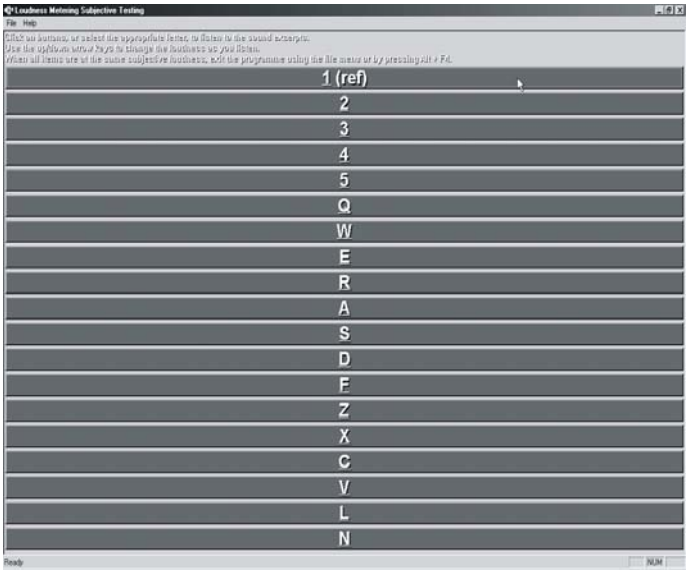
1770-07

مكّن نظام اختبار ذاتي متعدد القنوات مستند إلى برمجيات أعدتها وأسهمت بها هيئة الإذاعة الاسترالية، المستمعين من التحول لخطياً رواحاً ومجيئاً بين فقرات الاختبار مع ضبط السوية (ارتفاع الصوت) لكل فقرة. وترد في الشكل 8 لقطة من شاشة

برمجيات الاختبار. ومن الممكن ضبط مستوى فقرات الاختبار في خطوات قيمة 0,25 dB. كما يمكن إدخال الإشارة المرجعية عبر الضغط على الزر المؤشر عليه بالرقم "1"، مع ملاحظة أن مستوى الإشارة المرجعية ظل ثابتاً.

الشكل 8

السطح البيني للمستعمل لنظام اختبار ذاتي



1770-08

باستعمال لوحة مفاتيح الحاسوب، انتقى المعنيون فقرة اختبار محددة وضبطوا سويتها حتى تواءم ارتفاع صوتها مع الإشارة المرجعية. وبمقدور المعنيين الانتقال لحظيّاً بين أي من فقرات الاختبار عبر اختيار المفتاح المناسب. ويتم تشغيل السلاسل على نحو متواصل (عروة مغلقة) خلال الاختبارات وقد سجّلت البرمجية إعدادات الكسب الخاصة بكل فقرة من فقرات الاختبار على النحو المحدد من جانب المعنيين. ومن ثم، فقد أنتجت الاختبارات الذاتية مجموعة من قيم الكسب (بالديسيبل) اللازمة لمواءمة ارتفاع الصوت لكل سلسلة من سلاسل الاختبار مع السلسلة المرجعية. وقد سمح ذلك بتحديد ارتفاع الصوت النسبي لكل فقرة من فقرات الاختبار على نحو مباشر.

وقبل إجراء الاختبارات الصماء المنهجية، خضع كل من المعنيين لدورة تدريبية تعرفوا خلالها على برمجيات الاختبار ومهامهم في التجربة. وبما أن العديد من فقرات الاختبار احتوت على مزيج من الكلام وأصوات أخرى (مثل الموسيقى والضوضاء الخلفية، الخ)، تم توجيه المعنيين على نحو محدد لمواءمة ارتفاع صوت الإشارة الإجمالية، وليس مجرد محتوى الإشارات من الكلام.

وقُدمت فقرات الاختبار لكل مادة، خلال الاختبارات الصماء المنهجية، عبر ترتيب عشوائي. وعليه لم يقدم لاثنين من المعنيين فقرات الاختبار بترتيب واحد. وقد اتُّبع هذا المنهج للقضاء على أي تحيز محتمل نتيجة لتأثيرات الترتيب.

2.4 قاعدة البيانات الذاتية

تكونت قاعدة البيانات الذاتية المستعملة في تقييم أداء الخوارزمية المعروضة فعلياً من ثلاث مجموعات بيانات منفصلة. وأُنشئت مجموعات البيانات المذكورة من ثلاثة اختبارات ذاتية مستقلة أجريت خلال فترة امتدت لبضع سنوات.

وتكونت مجموعة البيانات الأولى من نتائج دراسة قطاع الاتصالات الراديوية الأصلية حيث قام المعنيون بمواءمة ارتفاع الصوت المدرك لحوالي 96 سلسلة سمعية أحادية الصوت. وبالنسبة لهذه المجموعة من البيانات، أُجريت الاختبارات الذاتية في خمسة مواقع منفصلة في العالم كفل بأدائها 97 مستمعاً. وقام فريق مؤلف من ثلاثة أشخاص أعضاء في فرقة العمل 6P SRG3 التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية بانتقاء سلاسل الاختبار بالإضافة إلى الفقرة المرجعية. وتكونت الإشارة المرجعية في هذه التجربة من كلام لأنثى باللغة الإنكليزية. وتكرر تشغيل السلاسل عبر مكبر صوت منفرد وضع أمام المستمع مباشرة.

ودفع بعض مؤيدي الخوارزمية، عقب الدراسة أحادية الصوت لقطاع الاتصالات الراديوية الأصلية، بأن مدى ونمط الإشارات المستعملة في الاختبارات الذاتية لم تكن واسعة بما فيه الكفاية. ودفعوا أيضاً بأنه لهذا السبب فإن خوارزمية *Leq*(RLB) البسيطة المستندة إلى الطاقة تفوق في الأداء جميع الخوارزميات الأخرى.

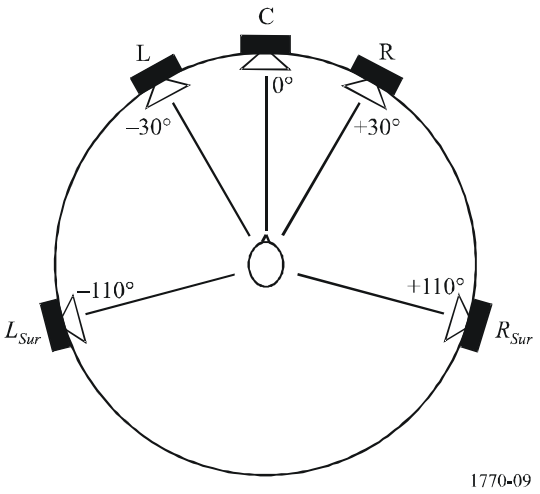
ولمعالجة هذه المشاغل، طُلب من مؤيدي هذه الخوارزمية تقديم سلاسل سمعية جديدة لإجراء جولة أخرى من الاختبارات الذاتية. كما شُجعوا على الإسهام بسلاسل أحادية الصوت يرون أنها ستكون أكثر تحدياً لخوارزمية *Leq*(RLB). ولم يسهم في تقديم سلاسل جديدة سوى اثنين من مؤيدي جهاز القياس.

وباستعمال هذه السلاسل الجديدة، أُجريت تجارب ذاتية منهجية في مختبر الإدراك السمعي لمركز بحوث الاتصالات في كندا. وقدم ما مجموعه 20 معنياً معدّلات ارتفاع صوت لـــ 96 سلسلة أحادية الصوت. واستعملت الاختبارات المنهجية الذاتية ذاتها المستعملة في وضع مجموعة البيانات الأولى، كما استعملت الإشارة المرجعية ذاتها. وشكلت نتائج هذه الاختبارات مجموعة البيانات الثانية لقاعدة البيانات الذاتية.

أما مجموعة البيانات الثالثة لمعدّلات ارتفاع الصوت فقد تكونت من 144 سلسلة سمعية. وتكونت سلاسل الاختبار من 48 فقرة أحادية الصوت و48 فقرة مجسمة و48 فقرة متعددة القنوات. وبالإضافة إلى ذلك، أعيد تشغيل نصف الفقرات أحادية الصوت عبر القناة المركزية (أحادية)، بينما أعيد تشغيل النصف الأخر من الفقرات أحادية الصوت من خلال مكبرات الصوت اليسرى واليمنى (ثنائي أحادي). وأُجري التشغيل المذكور للتعرف على الطريقتين المختلفتين اللتين يمكن بواسطتهما الاستماع إلى إشارة أحادية الصوت. وتكونت الإشارة المرجعية، لهذا الاختبار، من كلام لأنثى باللغة الإنكليزية في أجواء مجسمة وخلفية موسيقية منخفضة السوية. وشارك في هذا الاختبار 20 معنياً حيث أُستعمل تشكيل مكبرات صوت معين حُدد في التوصية ITU-R BS. 775، وتم تمثيله في الشكل 9.

الشكل 9

تشكيل مكبرات صوت استُعمل لمجموعة البيانات الثالثة



وكانت مجموعتا البيانات الأوليان قد اقتصرتا على سلاسل اختبار أحادية الصوت وعليه لم يكن التصوير عاملاً داخلاً في الاختبارات. واعتبر التصوير في مجموعة البيانات الثالثة، التي تضمنت سلاسل متعددة القنوات ومجسمة، عاملاً مهماً استدعى الدراسة. وتولد انطباع مفاده أنه قد يكون للتصوير والأجواء المحيطة داخل السلسلة السمعية تأثير كبير على ارتفاع الصوت المدرك للسلسلة. وعليه، تم اختيار سلاسل متعددة القنوات ومجسمة كي تشتمل على مدى واسع من أساليب التصوير (مثل تدوير فوتوغرافي مركزي مقابل تصوير ثابت يسار/يمين، و مصادر أمامية مقابل مصادر محيطة من جميع الجهات) وأنواع مختلفة من الأجواء المحيطة (مثل جو جاف مقابل جو صاخب).

وكانت حقيقة أن يقوم المعنيون بمواءمة ارتفاع الصوت للإشارات الأحادية، والثنائية الأحادية، والمجسمة، ومتعددة القنوات بشكل متزامن تعني أن هذا الاختبار كان أكثر صعوبة أساساً من مجموعات البيانات السابقة التي اقتصرت على الإشارات الأحادية. وقد زادت هذه الصعوبة من جراء أساليب التصوير المتعددة والأنواع المختلفة من الأجواء المحيطة. وكان هناك بعض الانشغال من أنه نتيجة، لهذه العوامل، قد تكون المهمة أكبر من إمكانيات المعنيين إلاّ أنه لحسن الحظ أظهرت الاختبارات الأولية أن المهمة قد تم إنجازها وأن المعنيين العشرين كانوا قادرين على تقديم نتائج متوافقة.

5 تصميم خوارزمية ارتفاع صوت متعدد القناة

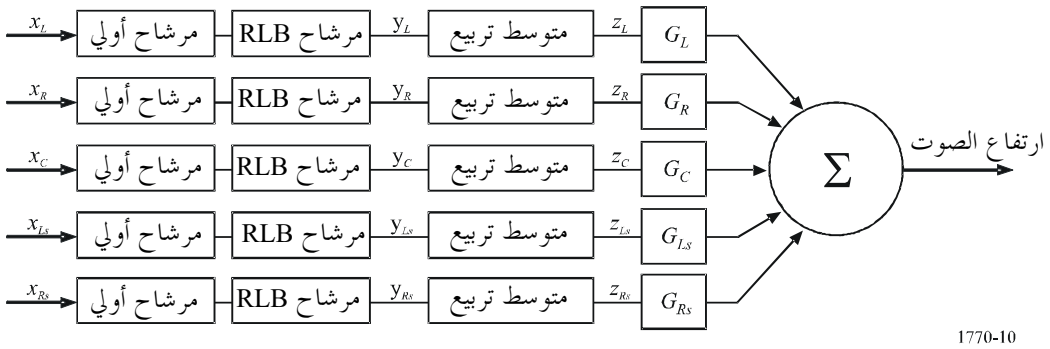
وكما ذُكر آنفاً، صممت خوارزمية *Leq*(RLB) لتعمل على الإشارات أحادية الصوت، وأظهرت دراسة سابقة أنها على درجة عالية من النجاح في هذا المجال. غير أن تصميم خوارزمية ارتفاع صوت لإشارة متعددة القنوات يفرض تحديات إضافية عديدة. ومن بين المتطلبات الرئيسية للحصول على خوارزمية متعددة القنوات ناجحة أنها ينبغي أن تكون صالحة كذلك للإشارات الأحادية والثنائية الأحادية والمجسمة. ومن الممكن القول إنه ينبغي النظر إلى هذه الصيغ بوصفها حالات خاصة لإشارة متعددة القنوات (وإن كانت حالات شائعة على حد كبير).

وقد افترضنا في الدراسة الحالية أن الإشارات متعددة القنوات تتوافق مع التشكيل القياسي للقناة الوارد في التوصية ITU-R BS.775 5.1. و لم تبذل جهود باتجاه حساب قناة ترددات LFE.

ويقاس ارتفاع الصوت، في جهاز قياس ارتفاع صوت متعدد القنوات، لكل من القنوات السمعية الفردية على نحو مستقل بخوارزمية *Leq*(RLB) أحادية الصوت كما هو موضح في الشكل 10. بيد أنّه، يُطبق ترشيح أولي على كل قناة قبل وحدة القياس *Leq*(RLB).

الشكل 10

مخطط إجمالي لجهاز مقترح لقياس ارتفاع صوت متعدد القنوات



ويكمن الغرض من وراء المرشاح الأولي في القيام بحساب التأثيرات الصوتية للرأس على الإشارات الواردة. وتم نمذجة الرأس هنا بوصفه كرة مصمتة. ويُطبق المرشاح الأولي ذاته على كل قناة. ويتم توسيط قيم ارتفاع الصوت (G_i) الناتجة حينئذ وفقاً لزاوية ورود الإشارة، ثم تُجمع بعد ذلك (في حيّز خطي) كي يعطي قياس مركب لارتفاع الصوت. ويُستعمل التوسيط لمراعاة حقيقية أن الأصوات التي تصل من خلف المستمع يمكن أن تُدرك بوصفها أعلى من الأصوات الواردة من أمام المستمع.

وتُعد البساطة فائدة رئيسية لخوارزمية ارتفاع الصوت متعددة القنوات المقترحة. وتتكون الخوارزمية المذكورة من وحدات معالجة إشارة أساسية على نحو كامل يتيسر تنفيذها في حيز الوقت بأدوات غير مكلفة. كما تعد قابلية الخوارزمية للتطوير فائدة رئيسية أخرى لها. وبما أن المعالجة التي تُجرى على كل قناة متطابقة، فمن الممكن استعمال جهاز قياس على نحو مباشر يكون قادراً على استيعاب أي عدد من القنوات من 1 إلى N. وبالإضافة إلى ما تقدم، وبما أن مساهمات القنوات الفردية تجمع بصفتها قيم ارتفاع صوت، وليس سوية الإشارة، لا تستند الخوارزمية إلى طور قناة بينية أو ارتباط. وهذا يجعل جهاز قياس ارتفاع الصوت المقترح أكثر عمومية وأكثر فعّالية.

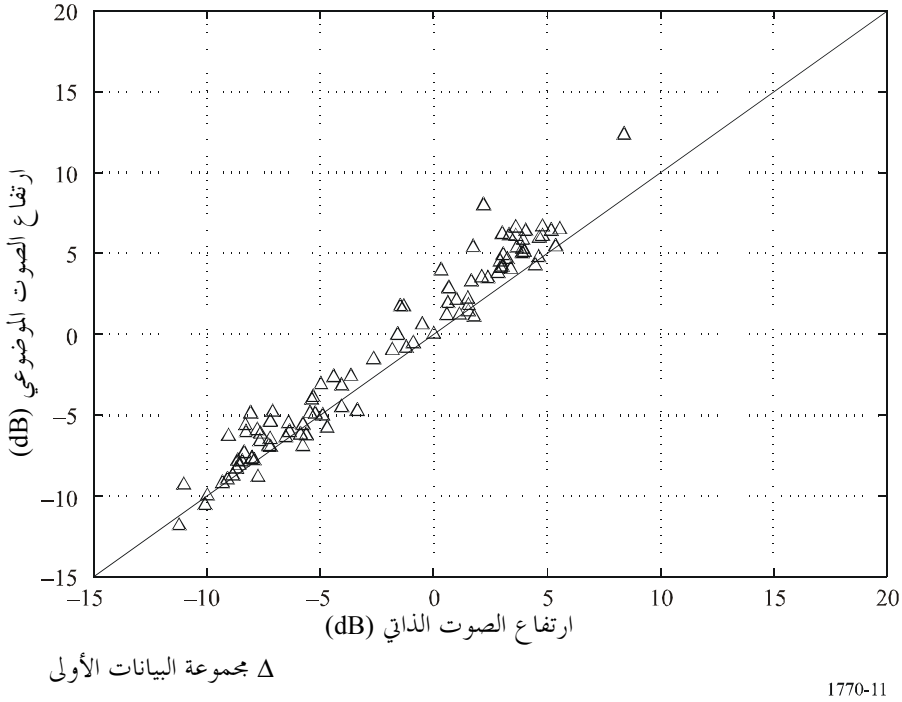
6 تقييم خوارزمية متعددة القناة

تمت معالجة السلاسل الصوتية البالغ عددها 336 المستعملة في مجموعة البيانات الثلاثة من خلال الخوارزمية متعددة القنوات المقترحة وتم تسجيل معدّلات ارتفاع الصوت المتوقعة. ونتيجة لهذه المعالجة، من الممكن تقييم الأداء الإجمالي للخوارزمية استناداً إلى الاتفاق بين المعدلات المتوقعة والمعدّلات الذاتية الفعلية التي يتم الحصول عليها في الاختبارات الذاتية المنهجية.

ترسم الأشكال 11 و12 و13 مخططاً لأداء جهاز قياس ارتفاع الصوت المقترح لمجموعات البيانات الثلاثة. ويوفر المحور الأفقي في كل من الأشكال الثلاثة ارتفاع الصوت الذاتي لكل سلسلة سمعية في مجموعة البيانات. أما المحور الرأسي فيشير إلى ارتفاع الصوت الموضوعي المتوقع من جهاز قياس ارتفاع الصوت المقترح. وتمثل كل نقطة في الرسم البياني نتيجة سلسلة سمعية منفردة. كما تجدر الملاحظة أن خوارزمية موضوعية مثالية سيتمخض عنها وقوع جميع نقاط البيانات على قطر ميله 1 ويمر بنقطة الأصل (كما هو موضح في الأشكال المذكورة).

الشكل 11

نتائج مجموعة البيانات (أحادية الصوت) الأولى (r = 0,979)

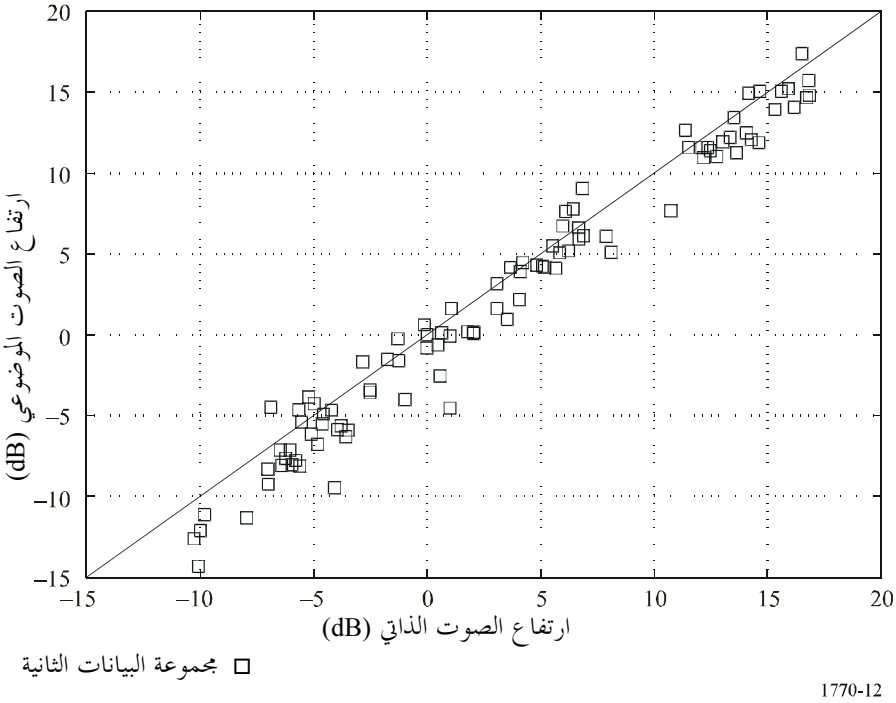


ويبدو واضحاً من الشكل 11 أن خوارزمية ارتفاع الصوت متعددة القنوات المقترحة تؤدي وظيفتها على نحو جيد قدر تعلق الأمر بتنبؤ النتائج من مجموعة البيانات (أحادية الصوت) الأولى. ويبلغ الارتباط بين معدلات ارتفاع الصوت الذاتي قياس ارتفاع الصوت الموضوعي r = 0,979.

وكما يظهر في الشكل 12، فإن الارتباط بين معدّلات ارتفاع الصوت الذاتي وقياس ارتفاع الصوت الموضوعي لمجموعة البيانات الثانية جيد جداً أيضاً r = 0,985. ومن الملفت ملاحظة أن نحو نصف السلاسل في مجموعة البيانات هذه كانت عبارة عن موسيقى.

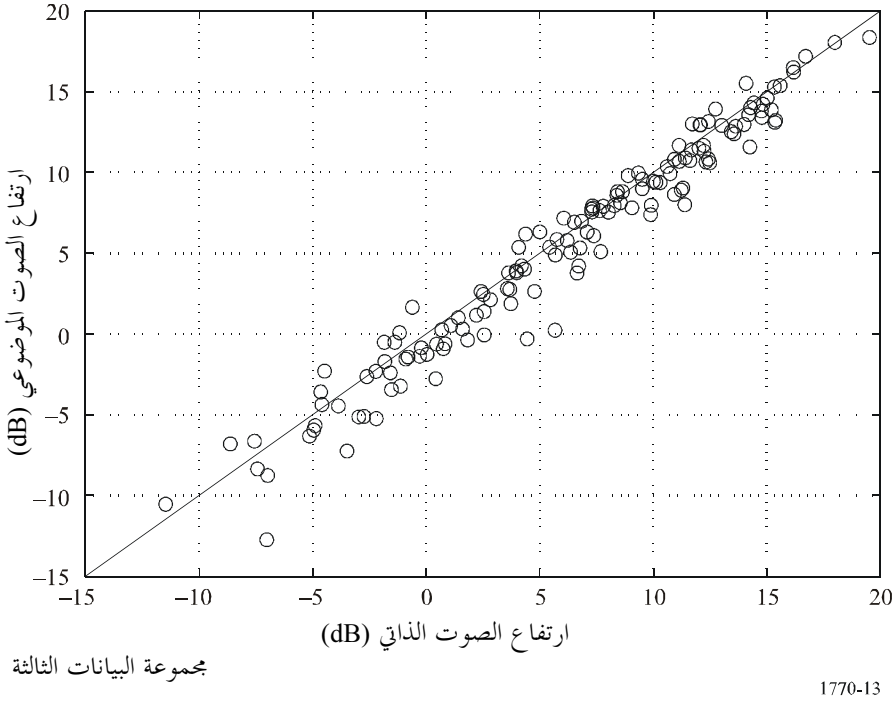
الشكل 12

نتائج مجموعة البيانات (أحادية الصوت) الثانية (r = 0,985)



الشكل 13

نتائج مجموعة البيانات (أحادية الصوت) الثالثة (r = 0,980)



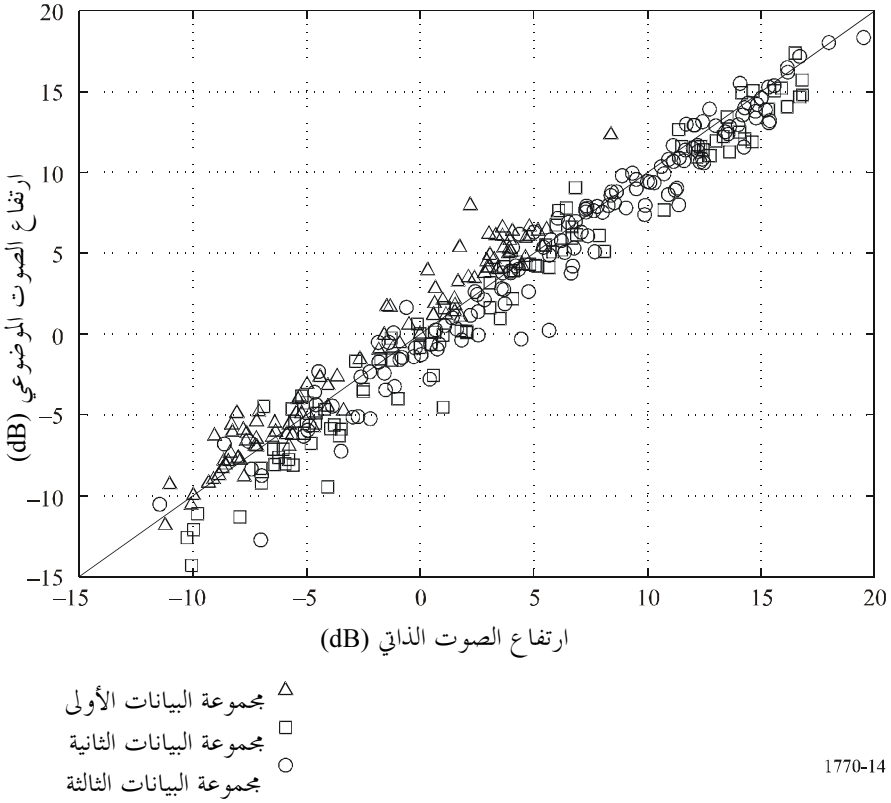
يبين الشكل 13 نتائج مجموعة البيانات الثالثة، التي تتضمن إشارات أحادية وثنائية أحادية ومجسمة ومتعددة القنوات. كما تعد النتائج متعددة القنوات الواردة في الشكلين 13 و14 خاصة بالخوارزمية المحددة، لكن بتحديد قيم ترجيح القناة المحيطة بنحو 4 dB

(القيمة المقترحة أصلاً) بدلاً من 1,5 dB (بموجب المواصفات النهائية). كما تم التحقق من أن تغيير القيمة من 4,0 dB إلى 1,5 dB ليس له تأثيراً يذكر على النتائج. ومرة أخرى يتضح أن أداء الخوارزمية جيد جداً بارتباط قدره $r = 0{,}980$.

ومن المفيد دراسة أداء الخوارزمية لجميع السلاسل السمعية البالغ عددها 336 التي تتكون منها قاعدة البيانات الذاتية. ومن ثم، فإن الشكل 14 يجمع بين النتائج المتحصلة من مجموعات البيانات الثلاث. كما يمكن ملاحظة أن الأداء جيداً جداً عبر قاعدة البيانات الذاتية بالكامل بارتباط إجمالي قدره $r = 0{,}977$.

الشكل 14

النتائج المجتمعة لجميع مجموعات البيانات الثلاث (r = 0,977)



وتشير نتائج هذا التقييم إلى أداء مثالي لخوارزمية قياس ارتفاع الصوت متعدد القنوات المستند إلى قياس ارتفاع الصوت *Leq*(RLB) عبر السلاسل البالغ عددها 336 لقاعدة البيانات الذاتية. وقد وفرت قاعدة البيانات الذاتية مدى واسعاً من مواد برنامج بما في ذلك الموسيقى والمسرحيات التلفزيونية والمسرحيات السينمائية والأحداث الرياضية والنشرات الإخبارية والمؤثرات الصوتية والإعلانات التجارية. كما تضمنت السلاسل مقاطع كلامية بلغات أجنبية متعددة. وبالإضافة إلى ما تقدم، تبرهن النتائج على أن جهاز قياس ارتفاع الصوت المقترح يعمل على نحو مثالي على الإشارات الأحادية والثنائية الأحادية والمجسمة فضلاً عن الإشارات متعددة القنوات.

المراجع

SOULODRE, G.A. [May 2004] Evaluation of Objective Loudness Meters, 116th Convention of the Audio Engineering Society, Berlin, Preprint 6161.

BENJAMIN, E. [October, 2004] Preferred Listening Levels and Acceptance Windows for Dialog Reproduction in the Domestic Environment, 117th Convention of the Audio Engineering Society, San Francisco, Preprint 6233.

الملحـــق 2

مبادئ توجيهية للقياس الدقيق لسوية "الذروة الحقيقية"

يصف هذا الملحق خوارزمية لتقدير سوية الذروة الحقيقية داخل إشارة سمعية رقمية ذات تشكيل شفرة نبضية (PCM) خطي لقناة منفردة. وتفترض المناقشة الواردة في هذا الملحق معدل عينة مقداره 48 kHz. كما تُعد سوية الذروة الحقيقية بمثابة القيمة القصوى (سلبية كانت أم إيجابية) لشكل موجة الإشارة في حيز الوقت المستمر؛ وقد تكون هذه القيمة أعلى من قيمة العينة الأكبر في حيز عينة الوقت المختبرة 48 kHz. وتوفر الخوارزمية تقديراً للإشارة كما هي، وتقديراً اختيارياً، لما ستكون عليه في حالة قيام تجهيزات تالية معينة بإزالة مكون التيار المستمر (DC) من الإشارة. وبوسع التشديد المسبق عالي التردد المعتدل الاختياري في مسير إشارة قياس الذروة تمكين الخوارزمية من تقديم سوية ذروة أعلى لإشارات عالية التردد خلافاً للواقع. ويكمن الغرض من هذا في أن زحزحات الطور لمراحل لاحقة لمعالجة الإشارة (مثل Nyquist) قد يتسبب في زيادة في ذروات الإشارة عالية التردد، وقد تكون هذه الخاصية مفيدة في بعض التطبيقات من حيث إنها توفر حماية مضافة من تقطيع الإشارات المعالجة.

1 خلاصة

الآتي بعد مراحل المعالجة:

1 توهين: توهين 12,04 dB

2 4 × اختبار العينات الزائد

3 التشديد: مرشاح انحدار التشديد المسبق، صفر عند 14,1 kHz والقطب عند 20 kHz (اختياري)

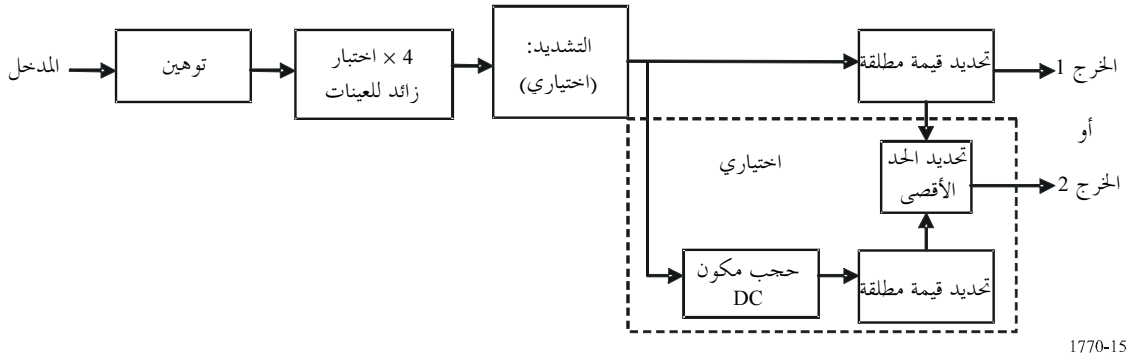
4 حجب لمكون DC (اختياري)

5 تحديد مطلق: قيمة مطلقة

6 تحديد الحد الأقصى: الكشف عن القيمة الأعلى (اختياري، تتواجد في حال وجود وحدة حجب لمكون DC)

يتيح الكشف عن القيمة المطلقة قبل وبعد استخدام وحدة حجب مكون DC تقدير سوية ذروة الإشارة عند نقطة القياس اللحظية، بالإضافة إلى تقدير سوية الذروة في حالة إزالة تجهيزة داخلية معنية لمكون DC للإشارة.

2 مخطط إجمالي



3 وصف مفصل

تتكون الخطوة الأولى من فرض توهين قدره 12,04 dB (زحزحة 2–بت). ويتمثل الغرض من هذه الخطوة في تهيئة ارتفاع مناسب لمعالجة الإشارة اللاحقة باستعمال حساب العدد الصحيح. ولا تعد هذه الخطوة ضرورية في حالة إجراء الحسابات في فاصلة كسرية طليقة.

ويزيد مرشاح اختيار العينات الزائد × 4 معدل اختيار عينات الإشارة من 48 kHz إلى 192 kHz. وتشير هذه القيمة الأعلى لمعدل العينة على نحو أدق إلى شكل الموجة الفعلي الممثل داخل الإشارة. وتعد معدلات اختيار العينات الأعلى ومعدل اختيار العينات الزائد مفضلة (أنظر التذييل 1 من هذا الملحق). وتتطلب الإشارات الواردة التي تكون عند معدلات اختيار عينات أعلى معدل اختيار عينات زائد أقل نسبياً (مثال، تُعد قيمة 2 × اختيار عينات زائد مناسبة لإشارة واردة عند معدل عينة 96 kHz)

ومن شأن مرشاح زحزحة التشديد المسبق الاختياري أن يتيح للخوارزمية إبراز سوية ذروة أعلى لعناصر الإشارة الأعلى تردداً. ومن الممكن القيام بذلك بعيداً عن اعتبار أنه من الصعوبة بمكان القياس والتحكم بقيم الذروة لعناصر الإشارة الأعلى تردداً نتيجة لتأثيرات تشتت (زحزحة الطور) التي تحدث في مرشاحات Nyquist العديدة التي تنشأ على نحو متكرر خلال حلقة إشارة إذاعية.

ويوفر مرشاح حجب مكوّن DC الاختياري تغطية للحالة حيث تكون الإشارة غير متناظرة إلى حد كبير، أو تحتوي على قدر من التخالف في DC. وإلى جانب ما تقدم فإن قياس قيمة ذروة الإشارة اللحظية (بما في ذلك غير المتناظر و/أو تخالف DC)، مع ضم هذا الجزء الاختياري من شأنه تيسير قياس الإشارة كما لو كان على إحدى تجهيزات التدفق الهابط أن تقوم بمهام مرشاح حجب لمكون DC.

وتؤخذ القيمة المطلقة للعينات من خلال عكس العينات ذات القيمة السالبة؛ وتكون الإشارة في هذه المرحلة أحادية القطب، مع الاستعاضة عن القيم السالبة بقيم موجبة بالمقدار ذاته. ويكون الخرج 1 بمثابة المقدار الغالب لقيم الخرج في حالة عدم تنفيذ عملية الحجب الاختيارية لمكون DC.

وفي حالة تنفيذ عملية حجب مكون DC الاختيارية، تختار وحدة "MAX" العينة الأكبر من كل عينة من مسيري الإشارة؛ ويؤخذ الخرج في هذه الحالة من الخرج 2.

وبمقدور وحدات النظام اللاحقة (لم تظهر أو تحدد في هذه الوثيقة) أن تقارن قيم عينة الخرج بسوية إشارة الذروة 100% الاسمية (1/4 للمقياس الكامل في حالة تطبيق 12 dB من التوهين عند المدخل)، حيث ينتج عنه تقدير لسوية الذروة الحقيقية بالنسبة للمقياس الكامل الرقمي.

التذييـــل 1*
للملحـــق 2

اعتبارات خاصة لقياس دقيق لذروة الإشارة السمعية الرقمية

ما المشكلة؟

غالباً ما تسجل أجهزة قياس الذروة في الأنظمة السمعية الرقمية "عينة ذروة" وليس "ذروة حقيقية".

وتعمل عادة أجهزة قياس عينة الذروة من خلال مقارنة القيمة المطلقة (المقوّمة) لكل عينة واردة بالقراءة الحالية لجهاز القياس؛ وإذا ما كانت العينة الجديدة أكبر فإنها تحل محل موضع القراءة الحالية؛ إذا لم تكن أكبر فإن قراءة التيار الحالية يتم ضربها في مقدار ثابت أقل بقليل من الوحدة لكي تؤدي إلى تضاؤل لوغاريتمي. وتُعد أجهزة القياس هذه واسعة الانتشار لأنها سهلة الاستعمال، لكنها لا تسجل عادة قيمة الذروة الحقيقية للإشارة السمعية.

وهكذا فقد يؤدي استعمال جهاز قياس عينة ذروة، حينما يكون القياس الدقيق لذروات البرامج ضرورياً، إلى مشاكل. ولسوء الحظ، تعتبر معظم أجهزة قياس الذروة الرقمية بمثابة أجهزة قياس عينة ذروة، رغم أن هذا الأمر لا يبدو واضحاً للمشغل عادة.

وتحدث المشكلة بسبب حدوث قيم الذروة الفعلية لإشارة عينة مختارة بين العينات عادة وليس لكونها عند لحظة اختيار العينات على وجه الدقة، وعليه لا تُسجل على نحو دقيق بجهاز عينة الذروة.

وتفضي هذه الحالة إلى عيوب شائعة عديدة في جهاز قياس عينة الذروة:

- *قراءات ذروة متضاربة*: يُلاحظ دائماً أن تشغيل تسجيل متماثل على نحو مكرر في نظام رقمي بجهاز قياس عينة ذروة يؤدي إلى قراءات مختلفة تماماً لذروات البرنامج عند كل تشغيل. وينطبق ذلك على حالة تشغيل تسجيل رقمي على نحو مكرر خلال محوّل معدل عينة قبل إجراء القياس، إذ ستكون الذروات المسجلة مختلفة أيضاً في كل تشغيل. ويرجع السبب في ذلك إلى إمكانية وقوع لحظات العينات على أجزاء مختلفة من الإشارة الحقيقية في كل تشغيل.
- *أحمال زائدة غير متوقعة*: بما أن إشارات العينة المختارة قد تحتوي على أحمال زائدة حتى عندما لا تكون بحوزتها عينات عند حدود، أو حتى قريبة من حدود، المقياس الكامل الرقمي، فإنه لا يعوّل على مؤشر زيادة الحمل لجهاز قياس عينة الذروة. وقد تتسبب الأحمال الزائدة في حدوث تقليم في العمليات اللاحقة، مثل التقليم الذي يمكن أن يحدث في محولات *D/A* على نحو خاص أو أثناء تغيير معدل عينة، حتى وإن لم يتم تسجيلها من قبل بجهاز قياس عينة الذروة (وحتى إن لم تكن مسموعة عند رصدها عند تلك النقطة).
- *قصور القراءة وخفقان النغمات المُقاسة*: قد يحدث قصور في قراءة النغمات الصافية (مثل نغمات الضبط) القريبة من عوامل العدد الصحيح لترددات أخذ العينات أو تؤدي إلى قراءة مختلفة على نحو ثابت إذا كان اتساع النغمة ثابتاً.

ما مدى خطورة المشكلة؟

من الممكن القول على نحو عام أنه كلما كان تردد عينة الذروة للإشارة المقاسة أعلى، كلما كانت إمكانية الخطأ أكبر.

---

* **ملاحظة** – يأتي هذا النص الغني بالمعلومات كمساهمة من الفريق العامل المعني بمعايير مجتمع الهندسة السمعية SC-02-01 من خلال مقرر فرقة العمل التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية 6J المعنية بقياس ارتفاع الصوت.

وبخصوص النغمات الصافية المستمرة، من السهولة بمكان البرهنة، على سبيل المثال، أن هناك قصوراً في القراءة بمقدار 3 dB لنغمة مزحزحة طورياً بشكل غير مناسب عند ربع تردد اختيار العينة. ومن الممكن أن يكون قصور القراءة لنغمة عند منتصف تردد اختيار العينات غير منته على نحو تقريبي؛ ومع ذلك، لا تحتوى أغلب الإشارات السمعية الرقمية على قدر مهم من الطاقة عند هذا التردد (لأنه يتم استبعادها بشكل كبير بمرشاحات ضد الإدخال الخطأ عند نقطة التحويل *D/A* ولأن الأصوات "الحقيقية" لا تسودها عادة ترددات عالية مستمرة).

ولا تحدث النبضات المستمرة غير القريبة من عوامل الإعداد الصحيحة المنخفضة لترددات أخذ العينة قصوراً في القراءة على أجهزة قياس عينة الذروة لأن ترددات النبضة (الفرق بين $n.f_{tone}$ وf_s) تعد عالية مقارنة بمقلوب معدل تضاؤل جهاز القياس. وبتعبير آخر، تعد لحظة أخذ العينات قريبة بما فيه الكفاية من الذروة الحقيقية للنغمة في أغلب الأحيان بما يكفل عدم قصور القراءة.

ومع ذلك، فبالنسبة للنغمات الفردية العابرة، لا يتم إخفاء حالات القصور في القراءات بواسطة هذه الآلية، وعليه فكلما كان محتوى ترددات النبضات العابرة الفردية عالياً، كلما تكون إمكانية حدوث القصور في القراءة أعلى. ويعد من الطبيعي في الصوت "الحقيقي" للنبضات العابرة أن تحدث بمحتوى ترددات عالية إلى حد بعيد، ومن الممكن حدوث قصور في القراءة لهذه النبضات على نحو طبيعي بمقدار عدة وحدات من dB.

وبما أن للأصوات الحقيقية، على وجه العموم، طيفاً يتلاشى باتجاه الترددات العالية، ولأن هذا الأمر لا يتغير مع زيادة ترددات اختيار العينة، يكون القصور في القراءة جهاز قياس عينة الذروة أقل حدة عند ترددات اختيار العينة الأصلية الأعلى.

ما الحل؟

من أجل قياس قيمة الذروة الحقيقية لإشارة عينة مختارة، من الضروري مضاعفة اختيار عينات (أو زيادة معدل اختيار عينات) الإشارة، أي إعادة تكوين الإشارة الأصلية على نحو جوهري، بين العينات الموجودة ويؤدي ذلك بدوره إلى زيادة تردد اختيار عينات الإشارة. ويبدو هذا المقترح مريباً: فكيف يتسنى لنا إعادة تكوين المعلومات التي تبدو أنها بالفعل فُقدت؟ والحقيقة، تُظهر نظرية اختيار العينات أن بمقدورنا فعل ذلك لأننا نعلم أن الإشارة المختارة لا تحتوي على ترددات تزيد عن نصف تردد اختيار العينات الأصلي.

ما معدل زيادة اختيار العينات الضروري؟ لمعرفة الرد نحتاج إلى الإجابة على سؤالين:

- ما الحد الأقصى المقبول لخطأ قصور القراءة؟
- ما معدل أعلى تردد يتم قياسه لتردد اختيار العينات (الحد الأقصى "للتردد المقيس")؟

إذا عرفنا هذه المعايير، سيتيسر حساب معدل زيادة اختيار العينات الذي نحتاجه (حتى من دون دراسة تفاصيل تطبيق عملية زيادة اختيار العينات) من خلال طريقة "ورقة-مخطط" مباشرة. وبمقدورنا ببساطة دراسة ما سيتمخض عنه قصور في القراءة من زوج من العينات بمعدل اختيار عينات زائد يحدث على نحو متماثل على جانبي ذروة منحنى جيبي عند التردد المقيس الأقصى. وهذا يمثل "أسوأ حالة" قصور في القراءة.

وعليه: فعند معدل اختيار عينات زائد، n

وعندما يكون التردد المقيس الأقصى، f_{norm}

وعند تردد اختيار العينات، f_s

ويمكننا رؤية أن:

فترة اختيار العينات عند معدل اختيار العينات الزائد تبلغ $1/n.f_s$

فترة التردد المقيس الأقصى تبلغ $1/f_{norm}.f_s$

وعليه:

يبلغ حد قصور القراءة الأقصى (dB) $20.\log(\cos(2.\pi.f_{norm}.f_s/n.f_s.2))$

(وقد وضع الرقم 2 في المقام حيث من الممكن أن نفقد ذروة بحد أقصى يبلغ نصف فترة اختيار العينات الزائد)

أو:

قصور القراءة القصوى (بوحدات dB) = $20.\log(\cos(\pi.f_{norm}/n))$

واستعملت هذه المعادلة في إعداد الجدول التالي، الذي يمكن أن يغطي المدى المطلوب.

معدل اختيار العينات الزائد	الحد الأقصى لقصور القراءة (dB) $f_{norm} = 0,45$	الحد الأقصى لقصور القراءة (dB) $f_{norm} = 0,5$
4	0,554	0,688
8	0,136	0,169
10	0,087	0,108
12	0,060	0,075
14	0,044	0,055
16	0,034	0,042
32	0,008	0,010

كيف ينبغي استعمال جهاز قياس ذروة حقيقية؟

تُجرى عملية اختيار العينات الزائد عبر إدخال عينات ذات قيمة صفرية بين العينات الأصلية لغرض توليد تيار بيانات عند معدل اختيار العينات الزائدة المرغوب به، وبعد ذلك يستخدم مرشاح "استكمال" لتمرير الترددات المنخفضة لاستبعاد الترددات الأكبر من قيمة f_{norm} القصوى المرغوبة. وإذا ما قمنا الآن بتشغيل خوارزمية عينة الذروة على إشارة العينة المختارة، يكون لدينا جهاز قياس ذروة حقيقية بقصور القراءة القصوى المرغوب بها.

ويعد النظر في تنفيذ جهاز اختيار عينات زائدة كهذا أمراً ملفتاً. وجرت العادة على تنفيذ مرشاح تمرير الترددات المنخفضة هذا بوصفه استجابة نبضة محدودة (FIR) متناظرة. وحيث يستعمل مثل هذه المرشاحات في تمرير إشارات سمعية بجودة عالية، مثلما يحدث في (الطراز القديم) من محوّلات *D/A* لاختيار العينات الزائد أو في محولات معدل اختيار العينات، فإنه من الضروري حساب عدد كبير من "التفريعات" بغرض الحفاظ على تمويجة نطاق تمرير منخفض جداً، وتحقيق الحد الأقصى من نطاق إيقاف التوهين ونطاق انتقال ضيق. كما ينبغي الحفاظ على طول كلمة طويل للإبقاء على مدى دينامي فضلاً عن تدنية التشويه.

ومع ذلك، بما أننا لن نستمع إلى خرج جهاز اختيار العينات الزائد، بل سيستخدم فقط لعرض قراءة أو إعداد رسم بياني خطي، قد لا يكون علينا تحقيق متطلبات الدقة ذاتها. وطالما كانت تمويجة نطاق التمرير، مضافاً إليها مكونات عرضية من نطاق الإيقاف، لا تحط من دقة القراءة بدرجة أكبر من المستهدف، فسيكون ذلك مرضياً لنا. ومن شأن ذلك أن يقلل من العدد المطلوب من التفريعات على نحو كبير، رغم أننا قد نبقى بحاجة إلى تحقيق نطاق انتقال ضيق تبعاً لهدفنا ذي الصلة بالتردد المقيس الأقصى. وعلى الصعيد نفسه، قد لا يتطلب طول الكلمة سوى أن يكون كافياً لضمان الدقة المستهدفة في الجزء السفلي الرسم البياني الخطي، إلاّ إذا استدعى الأمر الحصول على خرج رقمي دقيق بالنسبة للاتساعات المنخفضة.

واستناداً إلى ما تقدم، قد يتيسر تنفيذ جهاز اختيار عينات زائدة مناسب (ربما لقنوات عديدة) في إطار معالج إشارة رقمية (DSP) أو (FPGA) منخفضة الكلفة، أو ربما إجراء العملية بواسطة معالجات أكثر تواضعاً. ومن ناحية أخرى، تم تنفيذ

أجهزة قياس اختيار العينات الزائد باستعمال رقائق زيادة اختيار العينات عالية الدقة مخصصة لاستعمال محول *D/A*. وبينما تعد هذه الطريقة هدراً للسليكون والقدرة، بيد أن هذه الأجهزة قليلة التكلفة ومتوفرة في السوق بسهولة.

وتعد أبسط طريقة لتحديد العدد المطلوب من التفريعات ومعاملات التفريع لمواصفات جهاز قياس محدد هو استعمال برنامج تصميم مرشاح FIR التكراري مثل Remez أو Meteor.

وقد يتطلب أيضاً في حالة جهاز قياس الذروة استبعاد تأثير أي تيار مستمر داخل، حيث تعد أجهزة القياس السمعية مانعة لتيار DC على نحو تقليدي. ومن جهة أخرى، إذا كنا مهتمين بقيمة إشارة الذروة الحقيقية لأغراض القضاء على الحمولة الزائدة، عندها ينبغي الحفاظ على محتوى تيار DC وقياسه. وإذا ما تطلب الأمر، من الممكن إجراء استبعاد تيار DC بقدرة حساب منخفضة من خلال ضم مرشاح تمرير عالٍ (IIR) من النظام المنخفض الرتبة عند مُدخل جهاز القياس.

ويتطلب في بعض الأحيان قياس اتساع إشارة الذروة بعد استعمال أحد أنماط مرشاحات الترجيح بغية التأكيد على تأثيرات أجزاء محددة من نطاق التردد. ويعتمد التنفيذ على طبيعة مرشاح الترجيح المحدد.

_____