

Efectes digitals del senyal d'àudio

Helena Duxans Barrobés
Marta Ruiz Costa-jussà

PID_00188052



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

| | |
|--|----|
| Introducció | 5 |
| Objectius | 6 |
| 1. Introducció i classificació dels efectes digitals d'àudio | 7 |
| 1.1. Què és un efecte d'àudio? | 7 |
| 1.2. Presència dels efectes digitals d'àudio en la música actual | 8 |
| 1.3. Classificació dels efectes d'àudio | 8 |
| 2. Efectes sonors basats en retardadors | 10 |
| 2.1. Sistema retardador basat en filtres de pinta FIR | 11 |
| 2.2. Sistema retardador basat en filtres de pinta FIR amb temps de retard variable | 12 |
| 2.3. Sistema retardador basat en filtres de pinta IIR | 14 |
| 2.4. Filtre reverberador | 16 |
| 3. Efectes sonors basats en moduladors | 18 |
| 3.1. Estructura bàsica d'un modulador d'amplitud | 19 |
| 4. Efectes sonors basats en sistemes lineals | 21 |
| 4.1. Sistemes lineals basats en filtres passabanda | 21 |
| 4.2. Sistemes lineals basats en filtres de tall | 22 |
| 5. Efectes sonors basats en sistemes no lineals | 24 |
| 5.1. Sistemes no lineals de tipus distorsionador | 24 |
| 5.2. Sistemes no lineals de tipus rectificador de mitja ona | 28 |
| 6. Altres tipus d'efectes | 30 |
| 6.1. Efectes espacials | 30 |
| 6.2. Efectes temporals | 31 |
| 6.3. Metamorfosi d'àudio | 31 |

Introducció

En aquest mòdul expliquem què és un efecte digital d'àudio i els àmbits en què s'apliquen aquestes tècniques. Tot seguit fem una petita introducció als efectes digitals d'àudio més habituals i proporcionem exemples d'àudio de cadascun d'aquests efectes o referenciem creacions musicals que us puguin ser fàcils de trobar. A més, per a cada efecte expliquem les bases teòriques del processament digital del senyal dels sistemes que els generen. Per a completar la teoria, també proporcionem una implementació bàsica i genèrica de cada sistema.

El camp dels efectes d'àudio és molt extens, i els sistemes digitals per a implementar-los augmenten en complexitat a mesura que es requereix una sortida de més qualitat o de característiques o comportament molt particulars. L'objectiu de les implementacions que presentem en aquest mòdul és transmetre el concepte bàsic de l'efecte generat.

Per a què estudiar efectes digitals en senyals d'àudio?

El efectes digitals en música són una de les aplicacions del processament d'àudio més presents en la nostra vida quotidiana. Més enllà de la telefonia clàssica, on el processament d'àudio va tenir els seus inicis en el món comercial, o de l'emmagatzematge de fitxers d'àudio o multimèdia, que va complementar les aplicacions de transmissió telefònica, els efectes digitals han estès les aplicacions més acadèmiques del processament d'àudio per acostar la tecnologia cap a les creacions artístiques.

Per tant, estudiar els efectes digitals d'àudio ens permetrà explorar diferents camps d'aplicació del processament digital d'àudio.

Objectius

En acabar de treballar aquest mòdul, heu de ser capaços del següent:

- 1.** Identificar un efecte digital quan l'escolteu.
- 2.** Escollir quin tipus de sistema digital pot generar un efecte determinat.

1. Introducció i classificació dels efectes digitals d'àudio

1.1. Què és un efecte d'àudio?

Un efecte d'àudio és qualsevol modificació que es fa sobre un senyal d'àudio que provoca un canvi en la percepció del so. Els canvis introduïts pels efectes són des de molt subtils (per exemple, realçar alguna part de l'àudio o eliminar soroll de fons) fins a canviar totalment el so original (per exemple, els efectes creats en música moderna amb les guitarres elèctriques).

En aquest apartat ens centrarem en els efectes digitals d'àudio, en els quals la modificació del senyal es fa en el domini digital, per mitjà d'eines programari o de dispositius electrònics dedicats. En la figura 1 es mostra un diagrama de blocs d'un sistema digital d'efectes d'àudio genèric:

Sistema digital per a crear efectes d'àudio

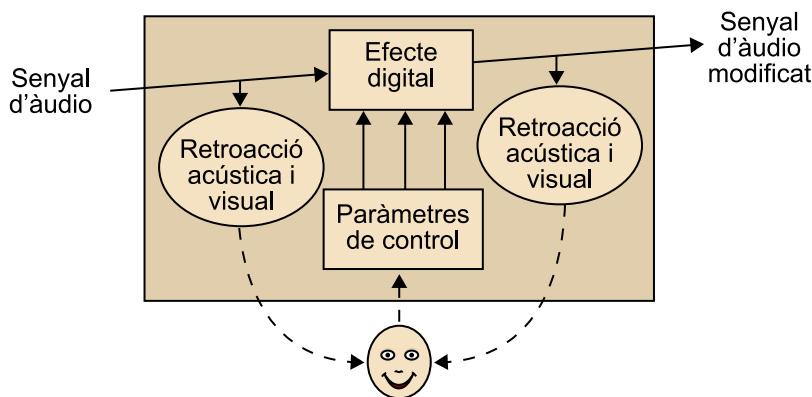


Figura 1. Diagrama de blocs funcional d'un sistema digital per a crear efectes sobre el senyal d'àudio

La majoria de sistemes de modificació de l'àudio permeten ajustar les característiques de l'efecte creat a partir d'uns paràmetres de control. Els enginyers de so i els músics ajusten aquests paràmetres per aconseguir les característiques del so volgut a la sortida.

Per a ajustar els paràmetres de control es necessita informació de com és el senyal d'entrada a cada moment i com l'afecta la modificació. Per aquesta raó, els dispositius digitals per a crear efectes disposen d'eines de retroacció o *feedback*, que poden ser acústiques (sortides d'àudio) o visuals (per exemple, barres de nivell lluminoses). La utilització correcta dels paràmetres de control per a crear els efectes volguts en l'àudio d'entrada és una tasca que requereix experiència.

Exemple

A partir del so original, s'ha generat un efecte trèmolo (més subtil) i un efecte wah-wah (més extrem).

Paràmetres de control

Nosaltres mateixos, quan escoltem un àudio amb un reproductor configurable (per exemple, una cadena hi-fi o un televisor), també podem ajustar els paràmetres de control de l'equalitzador que porta incorporat per a modificar el so que escoltem. Així, en el cas d'una cadena hi-fi, podem aconseguir la sensació de ser en un teatre, un pavelló, etc., segons que ens convingui depenent de la música o el so que escoltem.

Dos dels dispositius electrònics més utilitzats per a crear efectes d'àudio són les taules de mescles i els pedals d'efectes.

1.2. Presència dels efectes digitals d'àudio en la música actual

Actualment la modificació de l'àudio de manera digital és una pràctica que és present en tota la cadena de producció tant de música com de material radiofònic i audiovisual professional.

Fixeu-vos, per exemple, en la música moderna. Els efectes digitals són presents des de la generació de l'àudio, per mitjà de dispositius accionats pels músics mentre toquen. Molts guitarristes i baixistes utilitzen pedals d'efectes per a personalitzar les interpretacions, i fins i tot els teclats poden portar incorporats dispositius de generació d'efectes.

En una etapa posterior, en el procés de gravació i producció, les taules de mescles ofereixen als enginyers de so la capacitat de modificar l'àudio captat per cada micròfon per a eliminar discordances entre les gravacions i afegir efectes que aporten cos i matisos nous a la música. Les modificacions de l'àudio arriben fins a l'última etapa, la reproducció, quan els equalitzadors de les cadenes hi-fi o les estacions de ràdio s'ajusten per a adaptar la música a les característiques de l'oient i l'indret de reproducció.

1.3. Classificació dels efectes d'àudio

Hi ha moltes classificacions possibles dels efectes d'àudio: agrupant-los pel tipus de percepció que provoquen (per exemple, canvis lleugers o canvis profunds), agrupant-los segons la finalitat (per exemple, efectes d'interpretació o efectes de producció), etc.

En aquest apartat utilitzem una classificació segons el tipus de sistema digital que genera l'efecte. La taula 1 recull els sistemes digitals principals i exemples d'efectes que es poden generar a partir d'aquests sistemes:

Sistemes digitals per a crear efectes d'àudio

| Tipus de sistema digital | Exemples d'efectes que es poden generar |
|--------------------------|---|
| Retardadors | <i>Doubling, slapback, eco, reverberació, flanging, vibrato, chorus</i> |
| Moduladors | <i>Wah-wah, phasing, trèmolo, vibrato, flanging, chorus</i> |
| Sistemes lineals | <i>Wah-wah, phasing</i> |
| Sistemes no lineals | <i>Overdrive, distorsió, fuzz, octavador</i> |

Taula 1. Sistemes digitals per a crear efectes d'àudio i exemples dels efectes que poden crear.

Com es veu en la taula 1, hi ha efectes que permeten alternatives en la implementació digital. Per exemple, l'efecte vibrato es pot generar a partir d'un sistema retardador o a partir d'un modulador.

2. Efectes sonors basats en retardadors

Un retardador afegeix al so original una versió o més d'una versió del mateix so un temps després del so original.

En la figura 2 es mostra gràficament l'efecte d'un retardador. El senyal superior correspon a l'àudio d'entrada al sistema, el senyal entremig és una versió atenuada i retardada mig segon de l'àudio original, i el senyal inferior és la sortida del sistema, és a dir, la suma dels dos senyals anteriors:

Sistema retardador

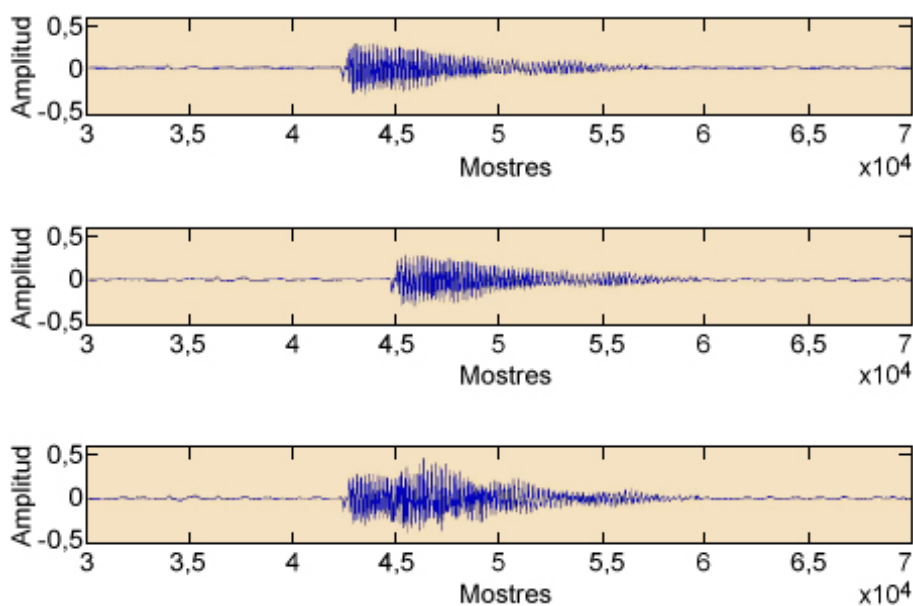


Figura 2. A dalt: senyal original. Al mig: versió atenuada i retardada mig segon del senyal original. A baix: senyal de sortida d'un retardador

L'efecte del retard és definit per tres paràmetres:

- El temps del retard: és el temps que hi ha entre el so original i la primera de les versions retardades. Aquest valor es dona en mil·lisegons.
- El nombre de retards: nombre de vegades que es retarda el so original, és a dir, el nombre de versions que hi ha a la sortida del sistema. Aquest valor pot estar entre 1 i infinit.
- L'atenuació: factor de modificació d'energia de cadascuna de les versions retardades respecte a la versió anterior. En el cas de la primera versió, aquesta atenuació és respecte al so original.

Retard síncron

En l'àmbit musical es defineix el retard síncron com l'efecte de retard en què el temps de retard és una fracció entera del *tempo*. Així, doncs, hi ha retards en blanques, negres, corxeres, etc.

Els retardadors generen efectes d'àudio diferents depenent dels valors a què s'ajustin els paràmetres de temps de retard, nombre de retards i atenuació.

2.1. Sistema retardador basat en filtres de pinta FIR

El filtre de pinta FIR s'utilitza per a introduir una sola versió retardada del so original, en què el retard és un valor constant. Per tant, els efectes que es poden generar amb aquesta estructura són del tipus següent:

- Temps de retard: constant
- Nombre de retards: 1
- Atenuació: constant

Si τ és el temps de retard, α el guany de l'àudio original a la sortida i β el guany (invers de l'atenuació) de la versió retardada, l'equació de diferències del retardador únic és la següent:

$$y[n] = \alpha x[n] + \beta x[n - M]$$

Filtre pinta FIR

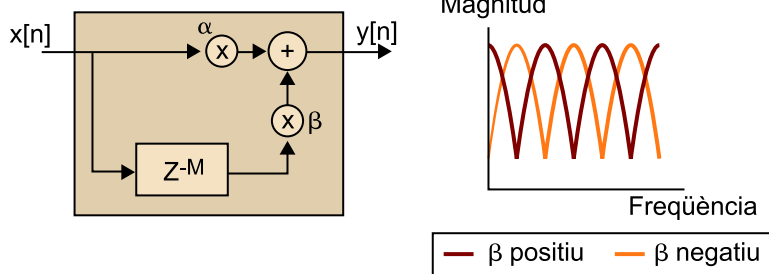


Figura 3. Sistema retardador basat en un filtre de pinta FIR: diagrama de blocs (esquerra) i magnitud de la resposta freqüencial (dreta)

Com observeu tant en l'equació com en la figura 3, la resposta en temps del filtre és el so original més una versió retardada M mostres i modificada en amplitud per un factor β .

La funció de transferència del filtre de pinta és la següent:

$$H(z) = \alpha + \beta z^{-M}$$

En la figura 3, a la dreta, es mostra la resposta freqüencial d'aquest filtre. Per a valors de β positius, el filtre amplifica totes les freqüències múltiples de $\frac{1}{T}$ i atenua les freqüències intermèdies. La forma de la resposta freqüencial del filtre, semblant a les pines d'un pinta, ha donat nom al filtre.

A continuació descrivim els efectes generats utilitzant filtres de pinta FIR:

- **Doubling o double tracking.** L'efecte *doubling* o *double tracking* consisteix a afegir una versió retardada molt pocs mil·lisegons a l'àudio original ($0 < \tau \leq 10$ mil·lisegons). Aquest efecte s'utilitza sobretot per a donar cos a les

Lectura de la fórmula

$x[n]$ és el so original
 $y[n]$ el so amb l'efecte

$$M = \frac{\tau}{f_m}$$

f_m és la freqüència de mostreig.

parts vocals de peces de música, encara que també es pot fer servir per a les parts instrumentals. Perceptivament, aquest efecte simula que hi ha dues persones (o instruments) cantant a l'uníson la mateixa melodia, però que les dues persones (o instruments) tenen la mateixa identitat.

Exemple

Els Beatles utilitzaven el *doubling* amb bastanta freqüència, com per exemple en *A Hard Day's Night* (1964).

Exemple de l'efecte *doubling*: enregistrament original i després d'aplicar-hi l'efecte. També sentireu un efecte *doubling* en el vídeo *Vocal Doubling | TC-Helicon Making Hit Vocals Ep. 4*.

- **Slapback.** L'efecte *slapback* està molt relacionat amb el de *doubling*. Com el *doubling*, aquest efecte introdueix una sola versió retardada de l'àudio original, però amb un temps lleugerament superior, de prop de desenes de mil·lisegons ($25 \leq M \leq 50$ mil·lisegons). Perceptivament, si s'està atent s'hi sent una repetició ràpida de l'àudio original. L'*slapback* és un efecte característic de les parts vocals del *rock-and-roll* dels anys cinquanta, tot i que també s'utilitza de vegades en instruments de percussió.

Exemple

Exemple de l'efecte *slapback*: enregistrament original i després d'aplicar-hi l'efecte.

2.2. Sistema retardador basat en filtres de pinta FIR amb temps de retard variable

El filtre de pinta FIR amb retard variable s'utilitza per a introduir una sola versió retardada del so original, però en la qual el temps de retard varia amb el temps. En aquest cas, el valor de M (mostres de retard) deixa de ser una constant per a convertir-se en una funció depenent del temps ($M(n)$: retard corresponent a la mosta n). Per tant, els efectes que es generen amb aquesta estructura són del tipus següent:

- Temps de retard: variable
- Nombre de retards: 1
- Atenuació: constant

L'equació de diferències d'aquest tipus de filtres es pot escriure de la manera següent:

$$y[n] = \alpha x[n] + \beta x[n - M(n)]$$

Filtre pinta FIR amb retard variable

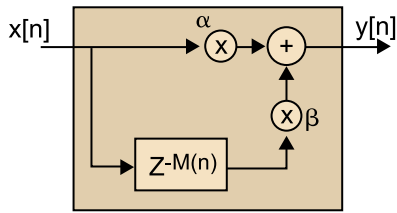


Figura 4. Diagrama de blocs d'un sistema retardador basat en un filtre pinta FIR amb retard variable

La funció de transferència d'aquest tipus de filtre varia amb el temps. En tot moment té forma de pinta (vegeu la part dreta de la figura 3), però les piques varien lleugerament la posició i l'amplada depenent del valor de M a cada instant.

A continuació descrivim els efectes generats utilitzant filtres de pinta FIR amb retard variable:

- **Flanging.** L'efecte *flanging* provoca un so metal·litzat oscil·lant, sobretot a freqüències mitges i altes, superposat a l'àudio original. Algun dels exemples de cançons en què s'utilitza aquest efecte és *(Just Like) Starting Over* (1980) de John Lennon –només a l'última frase de la cançó–, i *It's My Life* (2003) de No Doubt.

L'efecte *flanging* s'aconsegueix mesclant l'àudio original amb una única versió retardada en el temps, però amb la particularitat que el temps de retard és molt breu i varia de manera periòdica.

Habitualment, per a l'efecte *flanging*, el retard $M(n)$ és una funció triangular o sinusoidal; per exemple:

$$M(n) = M_0(1 + A \sin(2\pi f n T))$$

La funció $M(n)$ no sempre retorna valors de retards que es corresponen amb mostres enteres (per exemple, pot ser $M(n) = 9,66$). Per a obtenir els valors de $x[n]$ per a valors de n no enters (per exemple, per a $x[n=9,66]$) s'utilitzen tècniques d'arrodoniment.

En l'era analògica, l'efecte *flanging* es creava mesclant l'àudio provinent de dues cintes que contenien la mateixa gravació, però tocant alternadament les pestanyes de les rodes de gir (en anglès, *flange*) de cadascuna, per a provocar que una de les cintes es reproduís més lentament que l'altra i crear retards entre l'una i l'altra. Això va donar origen al nom.

Exemple

En el fitxer `flanging_original_i_efecte.mp3` hi sentireu un so seguit de dues modificacions al qual s'ha aplicat l'efecte *flanging*.

Un altre exemple de *flanging* el trobareu al vídeo `Effects 101: Flanger`.

Lectura de la fórmula

f és la freqüència que marca la velocitat de *flanging*

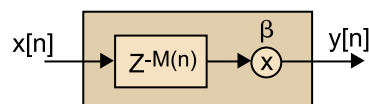
A és el valor màxim de variació del temps de retard respecte a M_0

M_0 és el valor mitjà del temps de retard

Els valors habituals de M_0 estan entre 0 mil·lisegons i 15 mil·lisegons.

- **Vibrato.** L'efecte *vibrato* consisteix a introduir variacions quasiperiòdiques en la freqüència d'un so. Perceptivament, l'oient sent el so original, però com si tremolés. Alguns exemples de *vibratos* que es produeixen de manera natural, és a dir, sense processar l'àudio, són els violins (o en general, els instruments de corda), quan es fa tremolar el dit que pressiona la corda, o les cordes vocals, quan s'hi provoquen variacions de tensió en cantar. Digitalment, l'efecte *vibrato* té una implementació directa mitjançant un modulador, però també es pot implementar per mitjà d'un filtre retardador, simulant l'efecte Doppler¹. Fixeu-vos que la diferència principal entre l'efecte *vibrato* i la resta d'efectes basats en estructures retardadores és que en el *vibrato* desapareix el so original. Això vol dir que el so resultant d'aplicar l'efecte només conté la versió retardada del so original. Per tant, per a crear l'efecte *vibrato*, s'elimina el camí directe (sense retard) del sistema FIR, o dit d'una altra manera, $\alpha = 0$. Així, doncs, l'estructura retardadora queda com es mostra en la figura 5:

Figura 5. Sistema retardador per a crear l'efecte *vibrato*



Efecte vibrato

$$y[n] = \beta x[n - M(n)]$$

En l'efecte *vibrato*, el rang habitual per als valors de $M(n)$ és entre 5 mil·lisegons i 10 mil·lisegons.

2.3. Sistema retardador basat en filtres de pinta IIR

El filtre de pinta IIR s'utilitza per a introduir un nombre infinit de versions retardades del so original. Per tant, els efectes que es poden generar amb aquesta estructura són del tipus següent:

- Temps de retard: constant
- Nombre de retards: infinits
- Atenuació: constant

En aquest tipus de sistemes, el senyal original circula per una línia de retard que se suma un altre cop a l'entrada. Cada cop que es retarda el senyal se'n modifica l'amplitud pel guany del retardador. En la figura 6 hi observeu una representació del filtre de pinta IIR:

⁽¹⁾L'efecte Doppler explica per què es perceben variacions en la freqüència d'un so quan hi ha un moviment relatiu entre la font acústica i el receptor. La variació de freqüència percebuda és deguda al fet que la distància entre la font acústica i el receptor varia. Un exemple de l'efecte Doppler és quan sentim la sirena d'una ambulància que passa a prop nostre. Quan l'ambulància s'acosta a nosaltres, augmenta la freqüència que percebem, mentre que, quan s'allunya, disminueix la freqüència que percebem. Per a simular l'efecte Doppler, en lloc de variar la distància entre la font acústica i el receptor es fa una acció equivalent: modificar el temps de retard entre la font i el receptor. Quan el retard varia periòdicament es produeix una variació periòdica en la freqüència percebuda i, per tant, es produeix un vibrato.

Exemple

Exemple de vibrato.

Filtre pinta IIR

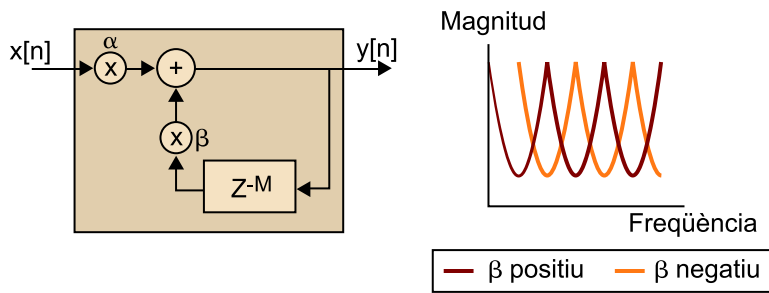


Figura 6. Sistema retardador basat en un filtre pinta IIR

Si τ és el temps de retard i β el guany (invers de l'atenuació) de les versions retardades, l'equació de diferències del filtre de pinta IIR és la següent:

$$y[n] = \alpha x[n] + \beta y[n - M]$$

La funció de transferència és la següent:

$$H(z) = \frac{\alpha}{(1 - \beta z^{-M})}$$

Observeu que es modifica l'amplitud de cada versió retardada del senyal original per un factor α^p , en què p és el nombre de vegades que el senyal ha estat retardat. Per a garantir l'estabilitat del filtre, el valor de β ha de ser més petit que 1, perquè si no creixerà sense límit el senyal de sortida.

En la figura 6, a la dreta, es mostra la resposta en freqüència del filtre de pinta IIR. Com en el cas del filtre FIR, s'amplifiquen totes les freqüències múltiples d' $\frac{1}{\tau}$ i s'atenuen les freqüències intermèdies. La diferència principal es troba en l'amplitud dels pics. En els filtres de pinta IIR, l'amplitud dels pics s'estreny a mesura que el valor α s'acosta a 1.

A continuació descrivim els efectes generats utilitzant filtres de pinta IIR:

- **Eco.** L'efecte eco consisteix a afegir a l'àudio original múltiples versions retardades i atenuades, imitant l'eco original que es genera a la natura. Per a apreciar els retards com a eco, el temps del retard ha de ser superior a 50 mil·lisegons ($\tau > 50$ mil·lisegons). Les versions es van atenuant fins que es tornen imperceptibles. L'efecte eco també es pot generar amb un filtre de pinta FIR, si l'objectiu és generar una sola versió retardada. Per a generar un nombre no infinit de versions retardades, es poden utilitzar filtres FIR encadenats.
- **Chorus.** L'efecte *chorus* consisteix a afegir a l'àudio original múltiples còpies retardades entre 10 mil·lisegons i 25 mil·lisegons respecte a l'original ($10 \leq \tau(n) \leq 25$ mil·lisegons) i amb petits canvis aleatoris en el temps de

Lectura de la fórmula

$x[n]$ és el so original
 $y[n]$ el so amb l'efecte

$$M = \frac{\tau}{f_m}$$

f_m és la freqüència de mostreig

Exemple

Exemple de l'efecte eco: enregistrament original i després d'aplicar-hi l'efecte.

Un altre exemple d'això el trobareu al vídeo Effects 101: Delay.

Vegeu també

Recordeu que hem parlat sobre l'eco en el darrer apartat del mòdul "Introducció a l'acústica".

retard. L'efecte creat és que a l'àudio original l'acompanya un "cor", i per això té aquest nom.

Exemple

Trobareu un exemple de *chorus* al vídeo Effects 101: Chorus.

2.4. Filtre reverberador

L'estructura més simple d'un filtre reverberador és una combinació de filtre de pinta FIR i IIR, tal com indica l'equació següent i es mostra en la figura 7:

$$y[n] = -gx[n] + x[n - m] + gy[n - m]$$

Filtre reverberador

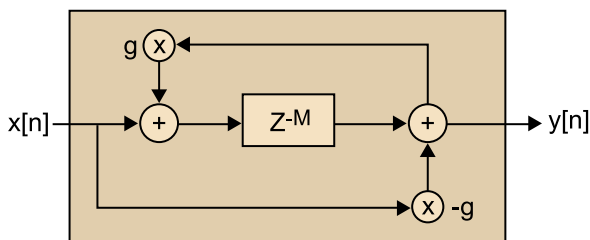


Figura 7. Diagrama de blocs de l'estructura més bàsica d'un filtre reverberador

Els sistemes més sofisticats per a crear reverberacions utilitzen models acústics d'entorns reals o virtuals per a convolucionar-los amb l'àudio que s'ha de modificar, i així transmetre les característiques de propagació de l'entorn al so.

Amb un filtre reverberador s'aconsegueix un efecte reverberació que consisteix a crear una reverberació artificial en l'àudio d'entrada. Perceptivament, l'efecte de reverberació aporta calidesa al so.

Recordem que la reverberació natural es genera per la reflexió del so, que arriba a l'oient quan encara no s'ha extingit el so original. Per tant, aquest efecte està format per múltiples versions retardades que se sumen a l'original, en la qual els retards de cadascuna de les versions, és a dir, el valor de τ , no supera els 50 mil·lisegons. Per a valors de retard superiors, ja no es percep reverberació, sinó un efecte més semblant a l'eco.

Un retardador afegeix al so original una versió o més d'una versió del mateix so un temps després del so original.

Els retardadors es defineixen per mitjà de tres paràmetres: el temps de retard (que pot ser constant o variable), el nombre de versions retardades (entre 1 i infinites) i l'atenuació de cada versió respecte a l'anterior. Els valors d'aquests tres paràmetres determina l'efecte creat.

Els filtres de pinta FIR s'utilitzen per a implementar efectes amb només una versió retardada respecte a l'original.

Vegeu també

Recordeu que hem parlat sobre la reverberació en el darrer apartat del mòdul "Introducció a l'acústica".

Exemple

Exemple de l'efecte reverberació: so seguit amb diferents efectes de reverberació (efecte creat per Nasca Paul amb el sintetitzador programari ZynAddSubFX).

Un altre exemple el trobareu al vídeo Effects 101: Reverb.

Els filtres de pinta IIR generen infinites versions retardades de l'àudio original (eco, reverberació, *chorus* i *vibrato*).

Per a generar un nombre finit de versions retardades es poden utilitzar múltiples filtres de pinta FIR encadenats.

En la taula següent es presenta un resum dels efectes generats amb estructures retardadores, on es recullen els valors orientatius de temps de retard, tipus de modulació pels retards variants i nombre de retards per a cadascun dels efectes presentats:

| Efecte | Temps de retard | Modulació | Nombre de retards | Sistema generador basat en |
|-----------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|--|
| <i>Doubling</i> | <10 ms | --- | 1 | Filtres de pinta FIR |
| <i>Slapback</i> | 25 ms - 50 ms | --- | 1 | Filtres de pinta FIR |
| <i>Flanging</i> | 0 ms - 15 ms | Sinusoidal (0,1 Hz - 1 Hz) | 1 | Filtres de pinta FIR, retard variable |
| <i>Vibrato</i> | 5 ms - 10 ms | Sinusoidal (5 Hz - 14 Hz) | 1 | Filtres de pinta FIR, retard variable i guany camí directe = 0 |
| Eco | >50 ms | --- | 1 - infinits | Filtres de pinta IIR |
| <i>Chorus</i> | 10 ms - 25 ms | Aleatòria | 1 - infinits | Filtres de pinta IIR |
| Reverberació | <50 ms | --- | Infinits | Filtre reverberador |

3. Efectes sonors basats en moduladors

La modulació és el procés de modificació dels paràmetres d'un senyal, anomenat senyal portador, segons un altre senyal, anomenat senyal modulador. Concretament, mitjançant la modulació es poden modificar tres paràmetres del senyal portador:

- L'amplitud.
- La freqüència.
- La fase.

La figura 8 mostra un exemple de modulació d'amplitud:

Modulació d'amplitud

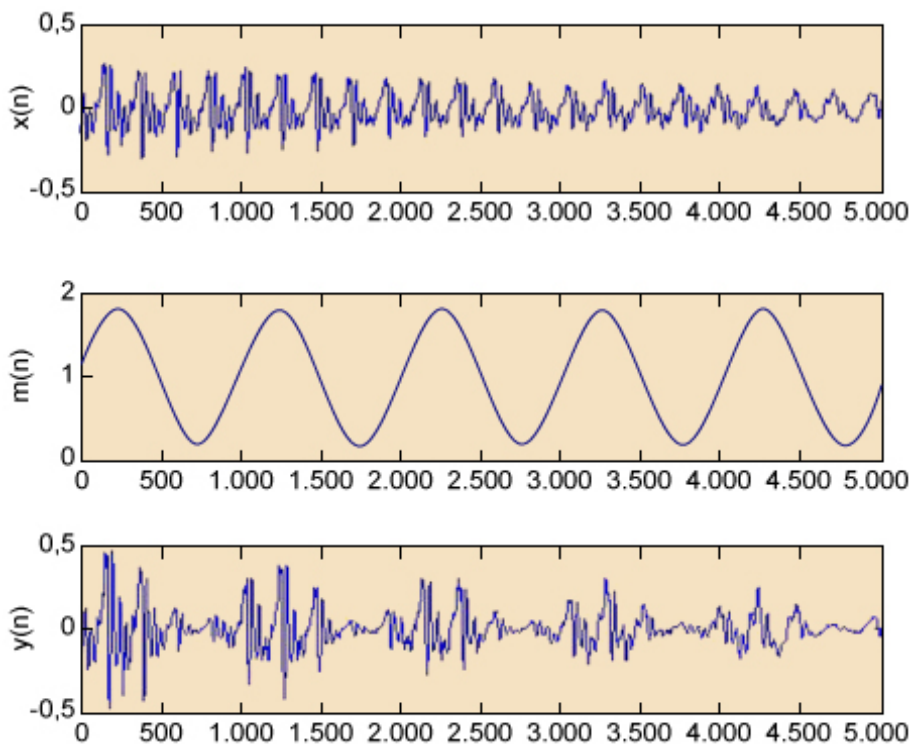


Figura 8. Modulació d'amplitud: $x[n]$ es correspon amb el senyal d'entrada (portador), $m[n]$ es correspon amb el senyal modulador i $y[n]$ és el resultat de la modulació en amplitud.

El senyal superior de la figura 8 és l'àudio original (portador), el senyal entremig és el senyal que actua com a senyal modulador (un senyal sinusoidal) i el senyal inferior és el senyal resultant de la modulació. Observeu com el senyal modulat segueix una evolució temporal igual que l'original, únicament canvia l'amplitud, depenent dels valors del senyal sinusoidal que actua com a modulador.

Els moduladors poden generar diversos efectes en l'àudio. De fet, són implementacions alternatives per a generar efectes que normalment es fan amb un altre tipus de sistemes, com per exemple *vibrato*, *flanger* o *chorus*, que es poden implementar amb un modulador de fase.

En aquest apartat analitzarem només els efectes basats en modulació d'amplitud.

3.1. Estructura bàsica d'un modulador d'amplitud

Un esquema simple de modulador AM (*amplitude modulator*) és el següent:

Modulador AM

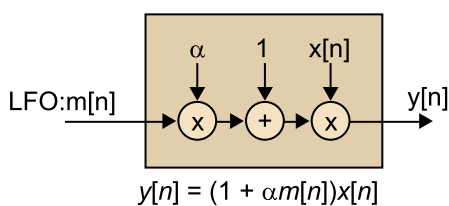


Figura 9. Modulador d'amplitud: senyal modulador $m[n]$, senyal portador $x[n]$, senyal modulat $y[n]$

Com a senyal modulador habitualment s'utilitza un oscil·lador de baixa freqüència, anomenat també *oscil·lador de baixa freqüència* o *low frequency oscillator* (LFO), amb una amplitud de pic igual a 1.

A continuació descrivim l'efecte trèmolo², efecte creat utilitzant moduladors d'amplitud. L'efecte trèmolo consisteix a introduir una fluctuació de l'amplitud (és a dir, del volum) de l'àudio, sense afectar el contingut freqüencial original.

El trèmolo prové d'abans de la música electrònica. Es troba sobretot en interpretacions amb instruments clàssics de corda. Un exemple de trèmolo no digital el trobareu a la peça *Recuerdos de la Alambra*, de Francisco Tárrega. Per a crear un trèmolo en instruments de corda, s'ha de fregar la corda (amb l'arquet o amb els dits) de manera repetitiva executant la mateixa nota.

El trèmolo és un efecte complementari al *vibrato* (fluctuació de la freqüència). Els trèmolos creats per instrumentistes o cantants, sense processament digital del senyal, acostumen a anar acompanyats de *vibratos*. La manipulació digital de l'àudio ha facilitat aconseguir *vibratos* i trèmolos purs.

Per a crear l'efecte trèmolo digitalment la freqüència de l'LFO del modulador AM ha d'estar per sota de 20 Hz. Per a freqüències superiors, la nostra orella és capaç de distingir la presència del senyal modulador com un component espectral diferenciat i, per tant, pot percebre el to del senyal modulador (que en aquest cas actua com a portador), la suma (portador + original) i la diferència (portador – original).

Lectura de la imatge

$x[n]$ és l'àudio original
 $m[n]$ és el senyal modulador
 α el coeficient que determina la profunditat de la modulació.
 $y[n]$ el senyal modulat
 L'efecte de la modulació és màxim per a un valor $\alpha = 1$ i no té cap efecte per a $\alpha = 0$

⁽²⁾El nom de *trèmolo* prové del terme italià *tremolo*, que significa 'trémolós'.

Exemple

Exemple de l'efecte trèmolo: enregistrament original i després d'aplicar-hi l'efecte.
 Un altre exemple el trobareu al vídeo Effects 101: Tremolo.

Exemple

Exemple d'efecte trèmolo generat a partir d'un to de 220 Hz i modulat a 10 Hz i exemple d'efecte trèmolo modulat a 150 Hz. Fixeu-vos que aquest últim àudio no és un trèmolo.

La modulació d'amplitud consisteix a modificar l'amplitud d'un senyal segons un senyal modulador.

L'efecte trèmolo es pot implementar per mitjà d'un modulador d'amplitud on el senyal modulador és un oscil·lador de baixa freqüència (per sota de 20 Hz).

4. Efectes sonors basats en sistemes lineals

En aquest apartat presentarem els efectes digitals que es poden crear amb sistemes compostos a partir dels filtres bàsics explicats en el mòdul "Disseny i anàlisi de filtres en processament d'audio". Tal com vam explicar, un filtre digital es pot definir com un sistema que modifica un senyal d'audio de manera que deixa passar un determinat interval de freqüències, amb un guany determinat, i n'atenua unes altres.

Vegeu també
 Recordeu la definició de sistema lineal que hem vist en l'apartat "Senyals i sistemes" del mòdul "Conceptes de senyals i sistemes".

Els filtres més utilitzats per a crear sistemes lineals generadors d'efectes d'audio són els filtres passabanda i els filtres de tall. En la figura 10, a manera d'exemple, es mostra la resposta freqüencial d'un filtre passabanda i un filtre de tall³:

⁽³⁾Un filtre de tall atenua una banda estreta de freqüències al voltant d'una freqüència concreta

Resposta freqüencial dels filtres

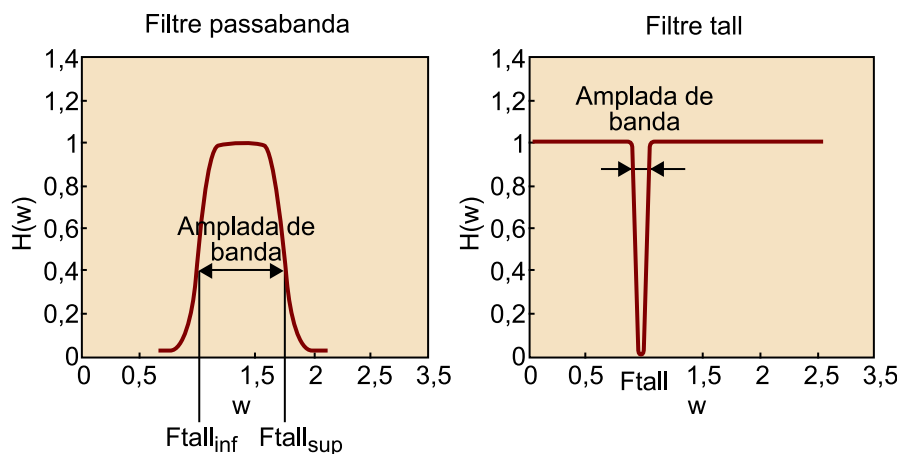


Figura 10. Resposta freqüencial d'un filtre passabanda (esquerra) i d'un filtre de tall (dreta)

4.1. Sistemes lineals basats en filtres passabanda

El sistema lineal basat en filtres passabanda més utilitzat per a crear efectes digitals d'audio segueix el diagrama de blocs que es mostra en la figura 11:

Sistema lineal basat en un filtre passabanda

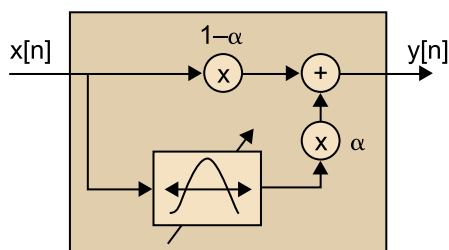


Figura 11. Diagrama de blocs d'un sistema lineal que incorpora un filtre passabanda, amb una freqüència central de la banda de pas variant amb el temps. El paràmetre α es correspon amb el guany del senyal filtrat.

La resposta del sistema consisteix en la suma del senyal d'entrada $x[n]$, amplificat per un factor $(1-\alpha)$, amb el senyal d'entrada filtrat per un filtre passabanda. La principal característica d'aquest sistema és que incorpora un filtre passabanda on la freqüència central de la banda de pas varia amb el temps.

A continuació descrivim l'efecte *wah-wah*, efecte aconseguït utilitzant filtres passabanda. L'efecte *wah-wah* consisteix a aplicar a l'àudio original un filtre passabanda de freqüència central variable en el temps i d'amplada de banda estreta. Aquesta versió filtrada s'afegeix a l'àudio original per aconseguir l'efecte volgut. Quan la freqüència central varia d'un valor baix a un valor alt, es produeix un so que recorda la veu humana pronunciant la interjecció *ua-aa-uaaa* (per això té aquest nom).

El guitarrista Jimi Hendrix va popularitzar aquest efecte a finals dels anys seixanta. En sentireu un exemple al començament de la cançó *Voodoo Child (slight return)* (1968) d'aquest guitarrista.

Aquest efecte s'aplica sobretot a guitarres elèctriques i baixos, tot i que també es troba en altres instruments electrònics. Els dispositius que s'utilitzen per a crear aquest tipus d'efecte en guitarres i baixos s'anomenen pedals de '*wah-wah*', ja que són uns pedals que els músics activen amb el peu. Aquests pedals contenen un processador del senyal que varia la freqüència central de la banda de pas segons la pressió en el pedal.

En l'etapa de producció d'àudio, també es pot crear l'efecte *wah-wah* substituint el peu del guitarrista per un oscil·lador de baixa freqüència, creant variacions de la freqüència central de manera periòdica i automàtica. Aleshores l'efecte pren el nom d'*autowah*.

Exemple

Exemple d'efecte aïllat de wah-wah aplicat a un to pur.

També trobareu un exemple d'efecte wah-wah al vídeo Efectes 101: Wah.

4.2. Sistemes lineals basats en filtres de tall

El sistema lineal basat en filtres de tall més utilitzat per a crear efectes digitals d'àudio combina una seqüència de filtres de tall variants en el temps amb l'àudio original, tal com es mostra en la figura 12:

Sistema lineal basat en filtres de tall

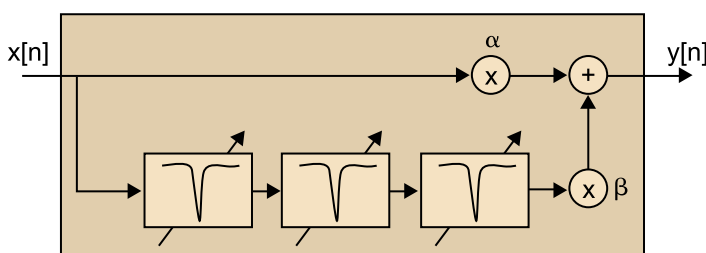


Figura 12. Sistema lineal format per una cascada de filtres de tall amb la freqüència de tall variant amb el temps

El resultat d'aquest tipus de sistemes és un senyal similar al senyal d'entrada, però amb múltiples freqüències atenuades.

A continuació descrivim l'efecte phasing, efecte que s'aconsegueix utilitzant filtres de tall. El *phasing* és un efecte perceptivament similar al *flanging*, és a dir, un so metal·litzat oscil·lant, sobretot a freqüències mitges i altes, superposat a l'àudio original.

Per a crear aquest efecte, la freqüència de tall del filtre varia amb el temps per mitjà d'un oscil·lador de baixa freqüència.

La diferència principal entre el *phasing* i el *flanging* és que el phasing aplica un nombre finit de talls (infinit per al *flanging*) i que els talls pot ser que no siguin equidistants (que ho siguin per al *flanging*).

Exemple

Trobareu un exemple de l'efecte *phasing* al vídeo Effects 101: Phaser.

Els filtres més utilitzats per a crear sistemes lineals generadors d'efectes d'àudio són els filtres passabanda i els filtres de tall.

L'efecte *wah-wah* consisteix a aplicar a l'àudio original un filtre passabanda de freqüència central variable en el temps i d'amplada de banda estreta. Aquesta versió filtrada s'afegeix a l'àudio original per a aconseguir l'efecte volgut.

L'efecte *phasing*, que es percep com un so metal·litzat oscil·lant, es genera utilitzant una seqüència de filtres de tall, amb la freqüència variant amb el temps per mitjà d'un oscil·lador de baixa freqüència.

5. Efectes sonors basats en sistemes no lineals

Un sistema lineal a la sortida no introdueix components freqüencials nous al senyal d'entrada, sinó que només varia l'amplitud i la fase dels components freqüencials de l'entrada. En canvi, els sistemes no lineals també introdueixen components freqüencials nous (harmònics⁴ o inharmònics⁵) que no eren presents en el senyal d'entrada.

⁽⁴⁾Donat un to a una freqüència fonamental (per exemple, 440 Hz), els components harmònics d'aquest to són tots els tons que són a una freqüència múltiple de la fonamental (880 Hz, 1.320 Hz, etc.).

Per a mesurar el grau de no-linealitat d'un sistema s'utilitza la distorsió harmònica total o *total harmonic distortion* (THD), que es defineix de la manera següent:

⁽⁵⁾Donat un to a una freqüència fonamental (per exemple, 440 Hz), s'anomena component inharmònic qualsevol to que no és harmònic (per exemple, 520 Hz).

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_N^2}{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_N^2}}$$

És a dir, és el valor de l'arrel quadrada de la ràtio de la potència de totes les freqüències harmòniques introduïdes pel sistema no lineal (fixeu-vos que el numerador no inclou A_1) respecte a la potència total del senyal de sortida del sistema. Com més alt és el valor de THD, més no lineal és el sistema.

5.1. Sistemes no lineals de tipus distorsionador

El distorsionador és el sistema no lineal més utilitzat en la creació d'efectes d'audio. Un distorsionador és un sistema no lineal basat en un amplificador, en què el guany $g[n]$ depèn del nivell de senyal d'entrada. En la figura 13 es mostra el diagrama de blocs d'un distorsionador:

Distorsionador

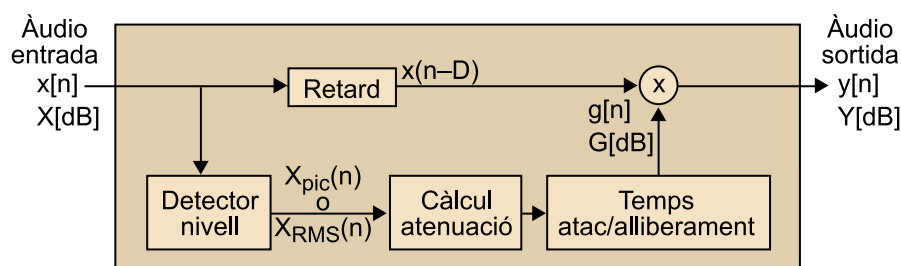


Figura 13. Diagrama de blocs d'un distorsionador

El funcionament del sistema representat en la figura és el següent. Per a cada instant es detecta el nivell d'audio d'entrada (nivell de pic⁶ $x_{pic}[n]$ o nivell d'RMS⁷ $x_{rms}[n]$, segons el procediment utilitzat) i depenent d'aquest nivell es determina el guany $g(n)$ que s'aplicarà al senyal d'entrada $x[n - D]$ per a generar la sortida $y[n]$:

⁽⁶⁾El nivell de pic d'un senyal es calcula a partir dels valors de pic (valor absolut) de les mostres del senyal d'entrada, mitjanats durant un període de temps. El valor es dona en decibels.

$$y[n] = g(n)x[n - D]$$

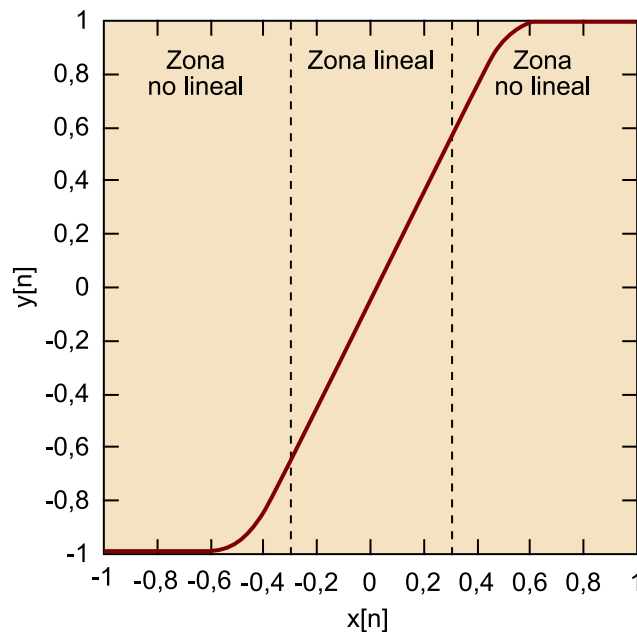
El retard de D mostres que s'aplica al senyal d'entrada és per a compensar el retard introduït pels mòduls de detecció de nivell i càlcul del guany.

La funció utilitzada per a calcular el guany determina l'efecte produït en l'àudio. Teòricament, es pot utilitzar qualsevol funció per a crear efectes, però no tots sonaran "desitjables" a les nostres orelles. Les funcions més utilitzades per a calcular el guany són les següents:

- **Soft clipping simètric.** Els efectes de distorsió provenen de l'època en què els amplificadors estaven construïts amb vàlvules, i no amb microprocessadors com ara. Les vàlvules tenen una resposta no lineal quan es troben en un punt de funcionament a prop del punt de saturació que tenen. En l'actualitat, el processament digital intenta simular el comportament de les vàlvules per crear les distorsions.

El *soft clipping* és una aproximació a la resposta de les vàlvules analògiques dels amplificadors. La figura 14 en mostra el comportament.

Soft clipping simètric



$$y[n] = \begin{cases} 2x[n] & \text{per } 0 \leq |x[n]| \leq 1/3 \\ \frac{x[n]}{|x[n]|} \left(\frac{3 - (2 - 3|x[n]|)^2}{3} \right) & \text{per } 1/3 \leq |x[n]| \leq 2/3 \\ 1 & \text{per } 2/3 \leq |x[n]| \leq 1 \end{cases}$$

Figura 14. Relació entre el senyal d'entrada $x[n]$ i el senyal de sortida $y[n]$ per al *soft clipping* simètric

Observeu que hi ha tres zones amb guanys diferents: una zona no lineal inferior, una zona lineal central i una zona no lineal superior. Aquest *soft clipping* s'anomena simètric perquè les zones no lineals tenen comportaments simètrics.

(7) El nivell de mitjana quadràtica o root mean square (RMS) d'un senyal és la mitjana dels valors d'un segment de n mostres, calculat de la manera següent:

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{x_m^2 + x_{m+1}^2 + \dots + x_{m+n-1}^2}{n}}$$

El valor es dona en decibels.

La figura 15 mostra la sortida d'aquest distorsionador quan s'hi aplica un senyal sinusoidal a l'entrada:

Soft clipping

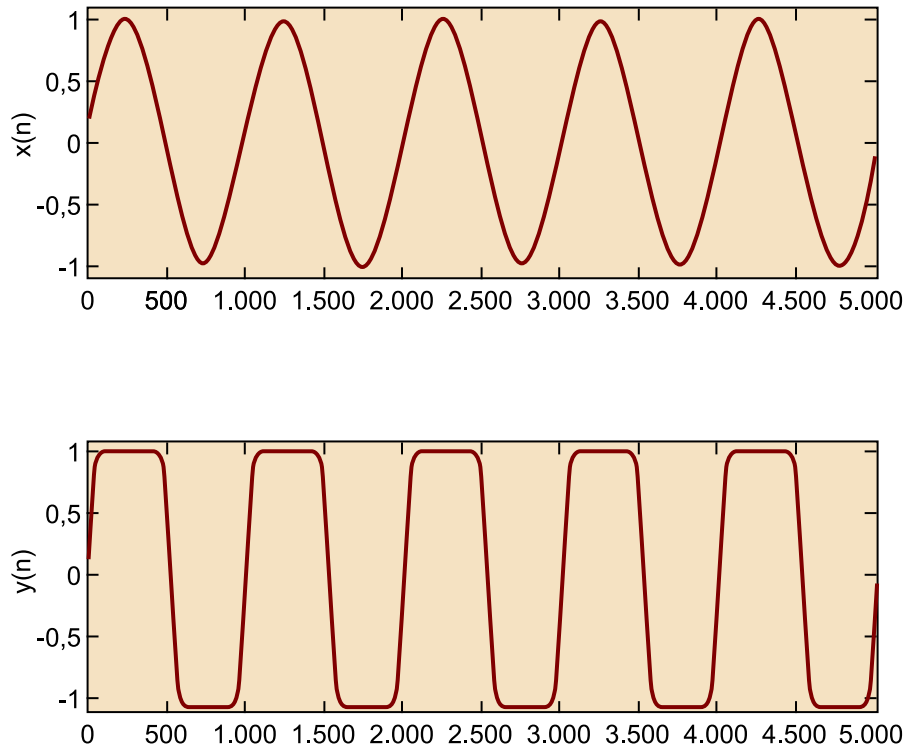
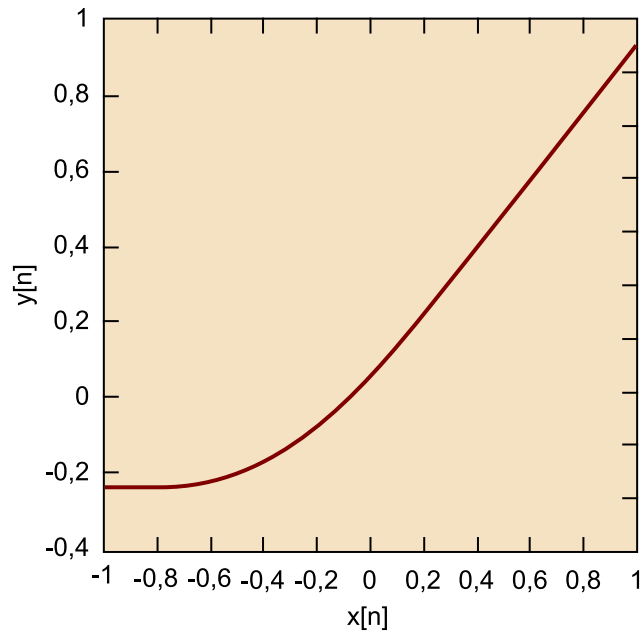


Figura 15. Senyal d'entrada $x[n]$ (representació superior) i de sortida $y[n]$ (representació inferior) en un distorsionador *soft clipping* simètric.

- **Clipping asimètric.** El clipping asimètric és una funció utilitzada per a simular el comportament dels tríodes (o vàlvules de tres elèctrodes) dels amplificadors analògics. Un possible *clipping* asimètric és el representat en la figura 16:

Clipping asimètric



$$y[n] = \frac{x[n] - Q}{1 - e^{-d(x-Q)}} + \frac{Q}{1 - e^{-d(Q)}}$$

Figura 16. Relació entre el senyal d'entrada $x[n]$ i el senyal de sortida $y[n]$ per al clipping asimètric. Per a fer la gràfica s'han utilitzat els valors $Q = 0,2$ i $d = 8$.

La figura 17 mostra la sortida d'aquest distorsionador quan s'hi aplica un senyal sinusoidal a l'entrada:

Soft clipping

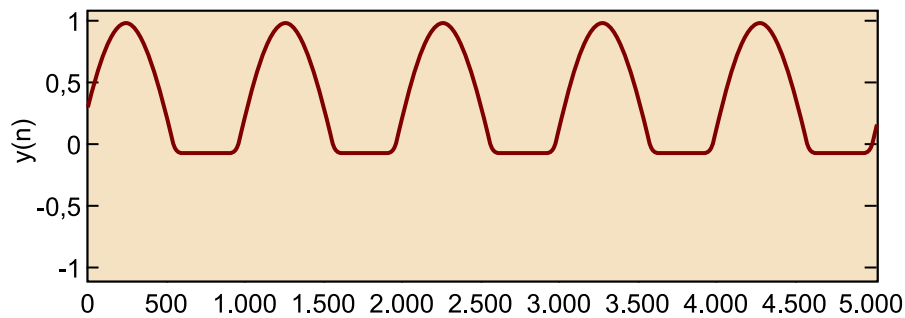
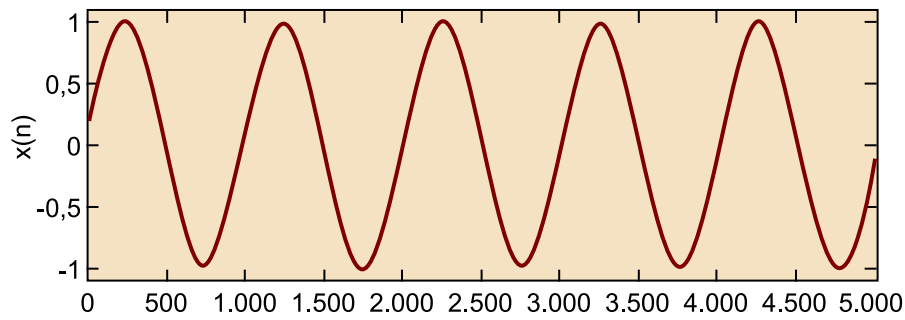


Figura 17. Senyal d'entrada $x[n]$ (representació superior) i de sortida $y[n]$ (representació inferior) en un distorsionador de clipping asimètric

A continuació descrivim els efectes *overdrive*, distorsió i *fuzz* generats utilitzant distorsionadors.

Els termes *overdrive*, *distorsió* i *fuzz* són utilitzats per a referir-se als efectes d'àudio utilitzats principalment en guitarres elèctriques, sia per mitjà d'amplificadors o per mitjà de pedals d'efectes, que aporten un so més característic de la música moderna.

Els tres efectes modifiquen la forma d'ona del so original a partir d'un determinat nivell d'entrada, de manera menys pronunciada en *overdrive* (utilitzant sobretot guanys amb *soft clipping* simètric), incrementada en distorsió i màxima en *fuzz* (utilitzant sobretot *clipping* asimètric). La frontera entre cadascun dels efectes no està predefinida en cap manual tècnic, sinó que és una qüestió d'estètica depenent de l'instrumentista.

L'efecte que provoca l'*overdrive* es defineix majoritàriament com a càlid i suau, ja que introdueix components harmònics en l'espectre. En canvi, l'efecte *fuzz* introdueix components inharmonics, i crea un efecte més dur i discordant.

Els efectes de distorsió són característics de la música *metal* i *grunge*.

5.2. Sistemes no lineals de tipus rectificador de mitja ona

Un rectificador de mitja ona és un sistema que a la sortida proporciona el valor de les mostres d'entrada quan són positives o el valor zero en cas contrari:

$$y[n] = \begin{cases} x[n] & \text{si } x[n] > 0 \\ 0 & \text{si } x[n] \leq 0 \end{cases}$$

Tal com es mostra en la figura 18, si a l'entrada d'un rectificador de mitja ona hi apliquem un senyal sinusoidal, l'espectre de sortida contindrà no solament la freqüència d'entrada (f_0), sinó totes les freqüències harmòniques d'ordre parell (és a dir, $2 f_0$, $4 f_0$, etc.):

Exemple

Trobareu un exemple d'*overdrive* al vídeo Effects 101: Overdrive.

Rectificador de mitja ona

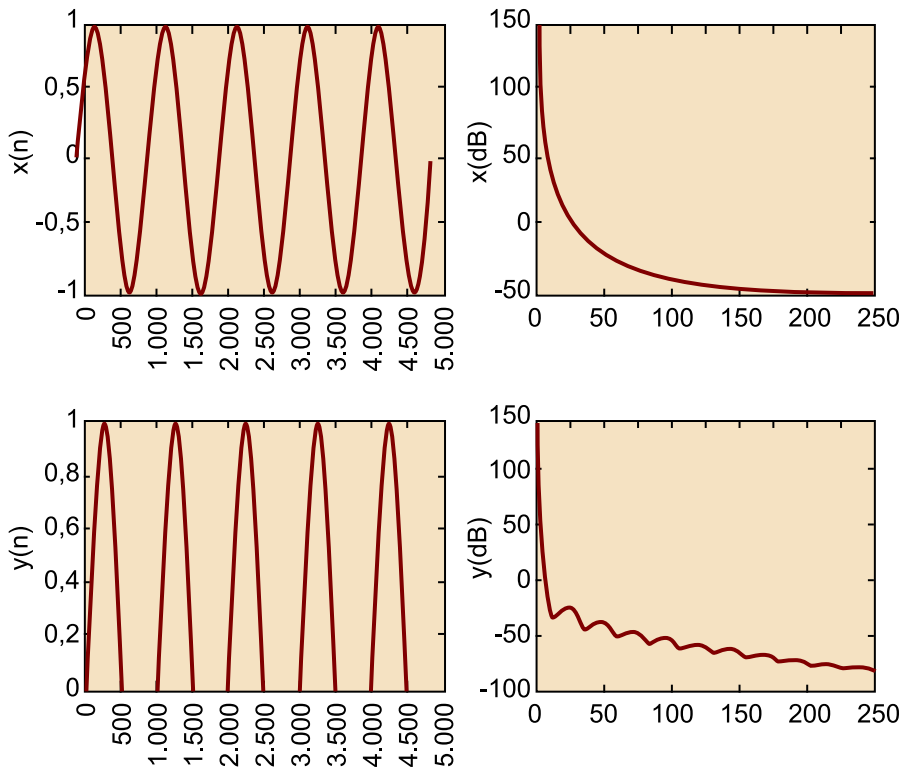


Figura 18. Gràfica superior: senyal sinusoidal d'entrada (esquerra) i l'espectre (dreta). Gràfica inferior: senyal de sortida d'un rectificador de mitja ona (dreta) i l'espectre

A continuació descrivim un efecte generat utilitzant rectificadors de mitja ona, l'**efecte octavador**, que consisteix a afegir al so original harmònics dels tons originals, simulant que simultàniament al to original sona el mateix to però en octaves superiors o inferiors. Una aplicació de l'octavador és realçar solos de guitarres.

Exemple

Trobareu un exemple de l'efecte octavador al vídeo Effects 101: Octaver.

Els sistemes no lineals modifiquen la forma d'ona del senyal d'entrada, introduint components freqüencials que no eren en el senyal d'entrada.

Un distorsionador és un sistema no lineal basat en un amplificador, en què el guany $g(n)$ depèn del nivell de senyal d'entrada.

Els distorsionadors que s'utilitzen per a crear els efectes overdrive, distortion i fuzz aproximen les corbes de guany dels amplificadors analògics que s'utilitzaven al començament de la música moderna.

Els rectificadors de mitja ona s'utilitzen per a generar l'efecte octavador, que consisteix a afegir al so original harmònics del senyal d'entrada.

6. Altres tipus d'efectes

En els apartats anteriors hem recollit els efectes d'audio principals que es troben en les taules de mescles o pedals d'efectes comercials avui dia. Per a completar el mòdul, tot seguit mencionarem altres aspectes del senyal que també es poden modificar per a crear nous matisos del so.

Tot i amb això, la llista d'efectes d'audio que conté el mòdul no és completa, ja que és un camp molt extens i dinàmic. La creativitat i l'experimentació dels músics i enginyers d'audio fa que sorgeixin nous efectes o es reinventin nous usos per a modificacions del senyal que ja es coneixien.

6.1. Efectes espacials

Quan escoltem un audio no solament sentim les característiques del senyal emès, sinó que el senyal es modifica segons el medi on es propaga. La mateixa cançó escoltada en un concert a l'aire lliure, dins d'una sala de concerts o amb auriculars sona diferent. A més a més, distingim si l'audio ens arriba des de davant nostre, des de darrere o des de qualsevol angle al voltant nostre.

Els efectes espacials es basen en les modificacions que experimenta un senyal en propagar-se en un indret concret i en una direcció concreta. D'aquesta manera es creen dues categories de modificacions dins dels efectes espacials:

- Creació d'entorns virtuals de propagació. Les tècniques de creació d'entorns virtuals modelen l'acústica d'un recinte, real o imaginari, de tal manera que es pot modificar qualsevol audio per a crear l'efecte que l'escoltem en un punt determinat del recinte. Per exemple, podem modificar una peça de música perquè sembli que l'escoltem en un estadi o dins d'una església.
- Creació d'audio 3D. Les tècniques d'audio 3D tenen com a objectiu modificar els senyals perquè tinguem la percepció que ens arriba des d'un punt concret de l'espai. Per exemple, podem canviar un audio perquè tinguem la sensació que ens arriba des de la dreta, des de darrere o des de dalt.

Exemple

Podeu escoltar un exemple d'audio 3D a la pàgina de [qsound](#).

El principal camp d'aplicació dels efectes espacials el trobem en més freqüència en la producció audiovisual, tot i que també n'hi ha exemples en la música electrònica.

6.2. Efectes temporals

Els efectes temporals es refereixen a tota la família d'efectes que té com a finalitat principal modificar el tempo de l'àudio, sia de manera uniforme o variable. Els exemples més senzills d'efectes temporals són augmentar o disminuir la velocitat de reproducció d'un àudio.

6.3. Metamorfofi d'àudio

El terme metamorfofi o *morphing* s'utilitza per a referir-se als efectes d'àudio que tenen per finalitat imposar les característiques d'un so a un altre so. Alguns exemples de metamorfofi són canviar el timbre d'un instrument perquè soni com un altre instrument o canviar la veu d'una persona perquè soni com la d'una altra.

Les tècniques de metamorfofi es troben encara en fase de recerca, sobretot en l'àmbit de la parla, ja que impliquen canvis profunds en el senyal que provoquen una pèrdua de qualitat de l'àudio resultant.

Un efecte d'àudio és qualsevol modificació que es fa sobre un senyal d'àudio que provoca un canvi en la percepció del so.

Actualment la modificació de l'àudio de manera digital és una pràctica que és present en tota la cadena de producció tant de música com de material radiofònic i audiovisual professional.

Els dispositius o eines programari que creen efectes d'àudio ofereixen controls manuals (amb opció a automatitzar-se) per ajustar la intensitat i l'efecte creat.

Els efectes d'àudio es generen a partir de:

- Retardadors (*doubling, slapback, eco, reverberació, flanging, vibrato, chorus*).
- Moduladors (trèmolo).
- Sistemes lineals (*wah-wah, phasing*).
- Sistemes no lineals (*overdrive, distorsió, fuzz, octavador*).

La creació d'efectes d'àudio en interpretacions o produccions musicals o audiovisuals és una tasca que requereix experiència, i no solament coneixements tècnics, per a produir els efectes volguts.

