

Traitement du Signal Audio

Auteurs : Mohamad, Qinyan Yang et David Man

Cour : Traitement du Signal

Professeur : Ivan Moyano

Introduction

Le traitement du signal audio constitue un pilier central de la technologie moderne, jouant un rôle crucial dans des domaines aussi divers que les télécommunications, la production musicale, la santé, et bien plus encore. À la base, ce domaine technique vise à améliorer, manipuler ou analyser des signaux sonores qui peuvent être sous formes analogiques ou numériques. Les techniques employées pour atteindre ces objectifs sont vastes et varient selon l'application spécifique, mais elles reposent toutes sur quelques principes fondamentaux de la théorie du signal.

La compression de données audio sert à réduire le volume de données nécessaires pour stocker ou transmettre ces médias sans altérer significativement leur qualité perçue. Cette compression peut être sans perte, où aucune information n'est perdue et le fichier original peut être parfaitement reconstruit, ou avec perte, où des données sont éliminées de façon irréversible pour obtenir des taux de compression plus élevés. La compression avec perte est souvent privilégiée dans les applications grand public où l'espace de stockage et la bande passante sont limités.

La filtration, quant à elle, concerne l'ajustement ou la modification des composantes fréquentielles d'un signal. Elle peut être utilisée pour supprimer des bruits indésirables, améliorer la clarté de la parole, ou encore ajuster la couleur sonore d'un enregistrement. Les filtres peuvent être implémentés de manière analogique ou numérique, avec des applications spécifiques allant de l'égalisation simple à des processus plus complexes comme la suppression d'écho.

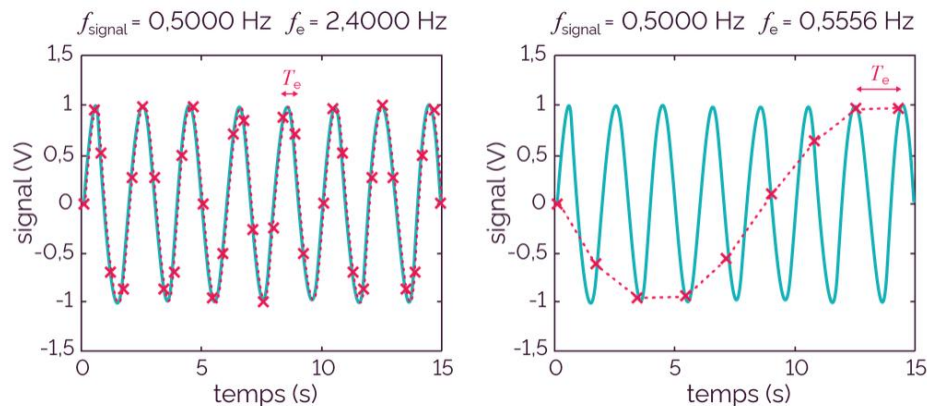
Fondamentaux

Le traitement du signal audio est une branche de l'ingénierie et de l'informatique qui traite de l'acquisition, de la manipulation, du stockage, du transfert et de la récupération de l'information audio. Cette technologie joue un rôle essentiel dans divers domaines tels que la télécommunication, la musique numérique, l'audio pour médias, la synthèse vocale et la reconnaissance, etc. Les signaux audios peuvent être classifiés en deux grandes catégories : analogiques et numériques.

Représentation des Signaux Audio

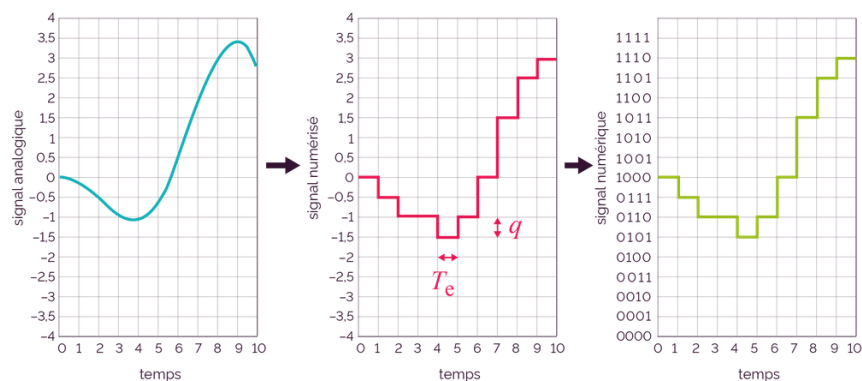
Signaux Analogiques vs Numériques

Les signaux **analogiques** sont continus tant dans le temps que dans l'amplitude, ce qui signifie qu'ils prennent une infinité de valeurs. Les signaux **numériques**, en revanche, sont discrets, ils ne prennent que des valeurs spécifiques à des instants de temps spécifiques, ce qui les rend plus adaptés au traitement informatique.



Conversion analogue-numérique

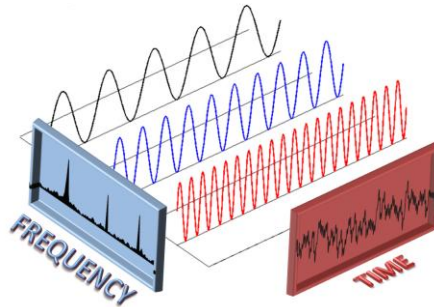
Pour convertir un signal analogique en signal numérique, nous devons passer par deux étapes cruciales : l'échantillonnage et la quantification. **L'échantillonnage** consiste à prendre des mesures du signal à des intervalles réguliers de temps. La théorie de l'échantillonnage de **Shannon - Whittaker** stipule que pour capturer toute l'information d'un signal analogique sans perte, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins le double de la fréquence la plus élevée présente dans le signal analogique. **La quantification**, d'autre part, implique la conversion de chaque échantillon mesuré en une valeur numérique basée sur un certain nombre de niveaux prédéfinis, ce qui affecte directement la précision et la qualité du signal numérisé en introduisant un bruit de quantification. Finalement, pour la transmission du signal numérisé, il est codé (**Codage**) en binaire en utilisant la base 2 composé de chiffres binaires, les bits.



Principes de Base

Transformée de Fourier

La **transformée de Fourier** est un outil mathématique qui transforme un signal du domaine temporel, où il est généralement décrit par l'amplitude en fonction du temps, au domaine fréquentiel, où il est décrit par l'amplitude et la phase en fonction de la fréquence. Cette transformation est essentielle pour l'analyse spectrale des signaux, la conception de filtres et d'autres applications en traitement du signal.



Filtres Numériques et Analogiques

Les **filtres** sont utilisés pour manipuler ou améliorer des signaux en permettant certaines fréquences de passer tout en bloquant d'autres. Les filtres peuvent être **analogiques** ou **numériques**. Les filtres numériques, tels que les filtres de moyennisation et gaussien qui jouent un rôle crucial dans le traitement des signaux numérisés en permettant une conception flexible et une mise en œuvre via des logiciels.

Techniques et Algorithmes Clés

Transformée de Fourier Rapide (FFT) et MDCT

La **FFT**, ou transformée de Fourier rapide, est une méthode efficace pour calculer la transformée de Fourier discrète (DFT), permettant une analyse fréquentielle rapide des signaux sonores. La **MDCT** (transformée en cosinus discrète modifiée) est un autre outil fréquemment utilisé en compression audio, en particulier dans les standards tels que MP3 et AAC, pour sa capacité à réduire les artefacts de blocage (cliquetis, bruits transitoires).

Quantification et Codage

La **quantification** peut être scalaire ou vectorielle, et elle est cruciale pour réduire la quantité de données nécessaires pour stocker un signal. Le **codage de Huffman** et le **codage arithmétique** sont des techniques de compression de données qui utilisent les fréquences d'apparition de symboles dans un ensemble de données pour réduire la taille totale du fichier.

Compression

La compression de signal désigne le processus par lequel on réduit la quantité de données requise pour représenter un signal spécifique. Ce processus est fondamental dans le domaine du traitement du signal et est utilisé pour réduire l'espace de stockage nécessaire et la bande passante utilisée lors de la transmission des données.

Principes de fonctionnement:

- **Redondance** : Éliminer les répétitions ou les prévisibilités dans les données.
- **Irrélevance** : Supprimer les informations qui ne sont pas détectables ou moins importantes pour la perception humaine ou l'application spécifique.

L'élimination des redondances se base sur le fait que les sons auxquels s'intéressent les humains ont une forte structure, comportant des répétitions et des périodicités qui rendent le signal quelque peu prévisible. On réduit la taille du fichier en ne transmettant que la différence entre le signal et ce qu'on peut en prévoir en considérant la partie précédente.

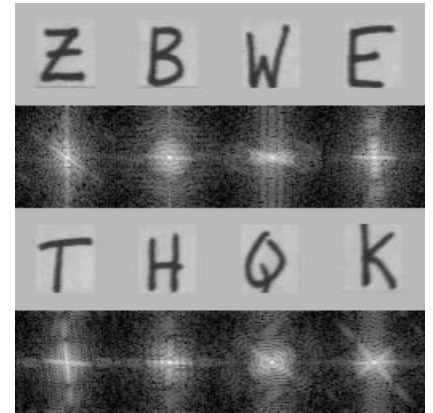
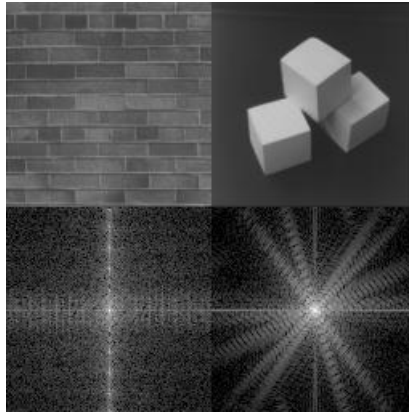
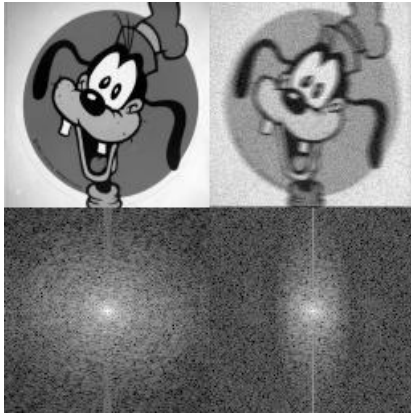
L'adaptation à la perception se fonde sur les caractéristiques de l'audition humaine, qui est un processus cognitif. L'auditeur oriente son attention selon l'objectif de la transmission, éliminant inconsciemment des éléments incohérents. On repère les parties de signal qui ne sont pas perçues, et on ne les transmet pas, ou sous une forme synthétique.

Le premier procédé permet la reconstitution exacte du signal ; le second abandonne délibérément des parties jugées sans importance, de la même façon qu'à la numérisation, on a abandonné les ultrasons, que les humains ne perçoivent pas. En contrepartie, le premier procédé n'obtient que des réductions modérées, alors que le second peut diminuer considérablement le débit numérique.

Types de compression:

1. **Compression sans perte** : Cette méthode permet de réduire la taille des données sans aucune perte d'information. Cela signifie que le signal original peut être parfaitement reconstruit à partir du signal compressé. Des algorithmes comme ZIP ou PNG utilisent ce type de compression.
2. **Compression avec perte** : Cette méthode réduit la taille des données en éliminant certaines informations jugées moins importantes, ce qui peut entraîner une perte de qualité. Le signal original ne peut pas être parfaitement reconstruit. Des formats tels que MP3 pour l'audio ou JPEG pour les images utilisent ce type de compression pour obtenir des taux de compression beaucoup plus élevés.

Compression d'image



Compression sonore

Production musicale et audio :

- **Équilibrage des niveaux :** Assure que tous les éléments d'un mixage musical ou d'une bande sonore sont clairement audibles, en réduisant les pics de volume et en augmentant les parties plus silencieuses.
- **Coloration et caractère :** Certains compresseurs ajoutent un caractère ou une couleur sonore particulière, appréciée pour donner du "corps" ou de la "chaleur" au son.

Radiodiffusion et Podcasting :

- **Uniformisation des niveaux sonores :** Importante pour les émissions de radio et les podcasts, garantissant que les voix sont constamment audibles, même dans des environnements bruyants.
- **Protection des équipements :** Préviens les dommages aux haut-parleurs causés par des pics de volume excessifs.

Télécommunications :

- **Optimisation de la bande passante :** La compression des données audio permet de réduire la quantité de données nécessaires pour transmettre la voix, optimisant l'utilisation de la bande passante dans les appels téléphoniques ou les conférences vidéo.

Filtration sonore

Filtrage : Le filtrage consiste à éliminer les signaux d'une bande de fréquences spécifique.

Les méthodes de filtrage visent à réduire les « défauts » d'un signal (bruit, mauvaise transmission, ...) en atténuant ou en accentuant certaines fréquences.

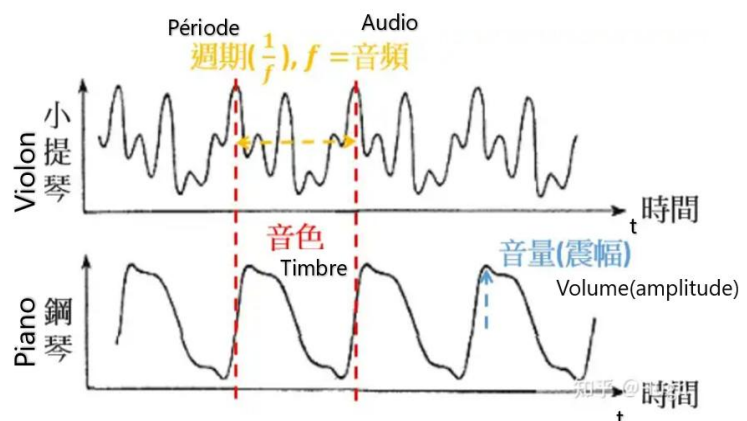
Les domaines d'application de la filtration sonore incluent la production musicale, la communication vocale et la suppression du bruit, etc.

- **Production musicale :** Dans la production musicale, les filtres sont utilisés pour ajuster la réponse en fréquence de différents instruments afin d'assurer l'équilibre et la clarté du mixage audio. Par exemple, les filtres passe-bas sont fréquemment utilisés dans les lignes de basse de la musique électronique pour mettre en avant leurs effets de vibrations basses.
- **Communication vocale :** Dans la téléphonie et les systèmes de vidéoconférence, les filtres sont utilisés pour éliminer le bruit de fond, améliorer la clarté et la compréhensibilité de la parole.
- **Suppression du bruit :** Dans les enregistrements audios réalisés dans des environnements bruyants, des filtres passe-haut et des filtres coupe-bande peuvent être utilisés pour éliminer les bruits sourds de basses fréquences et les interférences électriques d'autres fréquences.

Filtration sonore pour la production musicale :

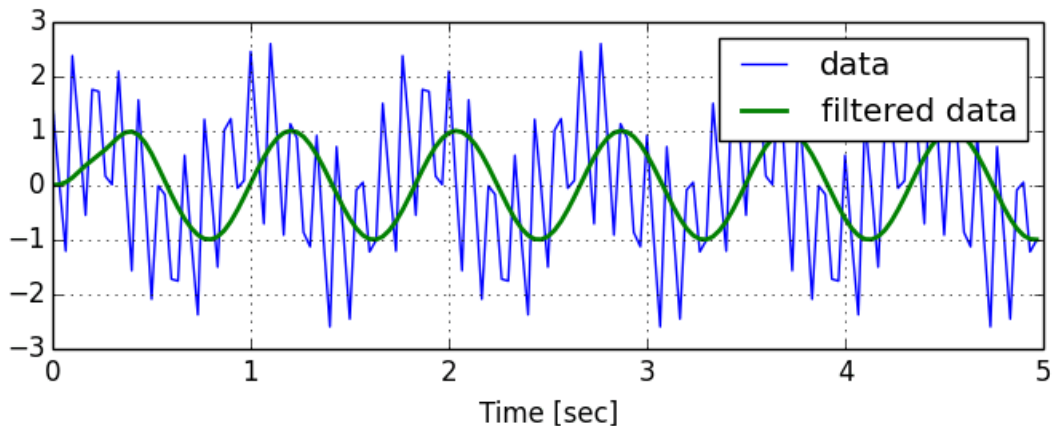
- **Volume :** En termes de signal, le volume représente l'amplitude du signal. Plus l'amplitude du signal est grande, plus le volume sonore produit est élevé.
- **Audio (Ton) :** La fréquence du signal, c'est ce qu'on appelle l'audio, ou la fréquence des vibrations sonores. Cela représente la hauteur du ton : plus la fréquence est élevée, plus le ton est haut. De plus, les sons produits par les instruments de musique ne sont pas des signaux à fréquence unique, mais incluent des fréquences fondamentales et des harmoniques.

- **Timbre :** Chaque personne ou chaque instrument produit un timbre différent. Du point de vue du signal, le timbre correspond à la forme d'onde du signal. Ainsi, en analysant la forme d'onde, il est possible de déterminer l'origine du son. La figure montre que la différence de timbre entre un violon et un piano est très marquée.



Filtre de moyennisation :

L'algorithme de filtrage par moyenne est un algorithme de filtrage couramment utilisé et relativement simple. Pendant le filtrage, il calcule la valeur moyenne des valeurs échantillonnées sur N périodes. C'est-à-dire, le signal se présente sous la forme d'un vecteur de \mathbb{R}^N correspondant à des échantillons du signal réel. Lorsque N est grand, le signal filtré est assez lisse, mais la sensibilité est faible ; à l'inverse, lorsque N est petit, l'effet de lissage est moins bon, mais la sensibilité est élevée.



D'après le cours, on sait qu'un filtre se traduit par un opérateur de **Convolution dans le temps** :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau) s(\tau) d\tau$$

Où $y(t)$ est le signal de sortie, $s(\tau)$ est le signal d'entrée $h(t-\tau)$ est la réponse impulsionnelle du filtre.

Où, de manière équivalente par **Multiplication dans le domaine fréquentiel (Transformée de Fourier)** :

$$\hat{y}(\omega) = \hat{h}(\omega) \hat{s}(\omega)$$

Où $\hat{h}(\omega)$ et $\hat{s}(\omega)$ sont les transformées de Fourier de $h(\tau)$ et $s(\tau)$ respectivement.

Le filtre de moyennisation calcule pour chaque instant la moyenne des instants proches :

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{|t-\tau| \leq T} s(\tau) d\tau, \text{ donc, ici } h(t - \tau) = \frac{1}{T} 1_{|t-\tau| \leq T}$$

Et donc $\frac{1}{T} \widehat{1_{|t-\tau| \leq T}}(\omega) = \frac{\sin(\omega T)}{\omega T}$, la fonction de transfert du filtre est un sinus cardinal, donc dans le domaine fréquentiel d'après le filtrage, l'effet des fréquences les plus élevées est atténué.

Posons des échantillons du signal $s=(s_1, \dots, s_N)^T$ pour $N \in \mathbb{N}$, on considère les voisins de $s_i, \forall i \in \{2, \dots, N-1\}$ par $x_i = \frac{s_{i-1} + s_i + s_{i+1}}{3}$, pour $i=1$ et N , $s_1 = \frac{s_1 + s_2}{2}$, et $s_N = \frac{s_{N-1} + s_N}{2}$

Sous forme matricielle, on obtient donc la matrice de filtrage :

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

Bilan :

- **Avantages :** L'algorithme est simple, il supprime efficacement les interférences périodiques et offre une grande douceur, ce qui le rend adapté aux systèmes avec de hautes vibrations fréquentielles.
- **Inconvénients :** Il est moins efficace pour supprimer les signaux anormaux et ne peut pas éliminer l'impact des impulsions.

Conclusion

Ce rapport a abordé en détail les fondamentaux et les techniques avancées du traitement du signal audio, un domaine crucial qui touche à presque toutes les facettes de la technologie moderne. Nous avons exploré les principes sous-jacents qui régissent la transformation des signaux, et les différentes méthodes par lesquelles ces signaux sont ensuite traités pour améliorer la qualité, la compressibilité, et l'utilité des données audio.

Parmi les concepts essentiels discutés, l'échantillonnage et la quantification se détachent comme la base de la conversion du signal. La Transformée de Fourier et ses dérivées, notamment la FFT et la MDCT, ont été identifiées comme des pierres angulaires pour l'analyse fréquentielle, filtration et la compression audio. Les techniques de compression et de filtration ont été examinées pour illustrer comment elles permettent une qualité de audio acceptable pour l'utilisateur final.

Les applications de ces techniques sont vastes, touchant à la production musicale, la radiodiffusion, les télécommunications et bien au-delà. Dans chaque cas, la capacité à compresser efficacement les données audio sans dégrader perceptiblement la qualité est essentielle pour la distribution de contenu numérique à grande échelle. De même, les techniques de filtration sont employées pour améliorer la clarté sonore, réduire ou éliminer les bruits indésirables et optimiser les performances des systèmes de communication audio.

L'importance d'une solide connaissance théorique ne peut être sous-estimée. Comprendre les principes fondamentaux du traitement du signal permet non seulement de mettre en œuvre des solutions existantes mais aussi d'innover de nouvelles approches qui peuvent pousser les capacités de la technologie audio encore plus loin.

Références :

- Polycopie
- <https://www.dspguide.com/ch27/2.htm>
- <https://www.cs.unm.edu/~brayer/vision/fourier.html>
- https://www.jeanfeydy.com/Teaching/MasterClass_Radiologie/Part%206%20-%20JPEG%20compression.html
- <https://www.projethomestudio.fr/reglages-compresseur-audio/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Compression_de_donn%C3%A9es_audio
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Apple_Lossless
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Free_Lossless_Audio_Codec
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/MP3>
- https://zhuanlan.zhihu.com/p/668379315?utm_psn=1767662679710134272
- <https://zhuanlan.zhihu.com/p/647255524>
- <https://zhuanlan.zhihu.com/p/678715752>
- <https://blog.csdn.net/u013263891/article/details/83048641>
- <https://blog.csdn.net/bhniunan/article/details/104589214>
- <https://cloud.tencent.com/developer/article/2320325>
- <https://www.maxicours.com/se/cours/conversion-d-un-signal-analogique-en-signal-numerique/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transformD
- https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform
- https://en.wikipedia.org/wiki/Modified_discrete_cosine_transform
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Codage_de_Huffmand
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Codage_arithm%C3%A9tique