

filtre coupe-bande de Fliege pour les mesures audio

faites de meilleures mesures avec un filtre coupe-bande

Alfred Rosenkränzer (Allemagne)

Lors de la mesure des caractéristiques clés d'un circuit audio, pour certains paramètres, il est très souhaitable de supprimer le signal de test de la sortie du circuit avant d'envoyer le signal de sortie à l'entrée de l'équipement de test. C'est exactement le sujet de cet article.

Comme mentionné précédemment dans l'article « Testeur audio bon marché » [1] d'Elektor 07-08/2022, les interfaces audio USB qui peuvent être utilisées avec un logiciel adapté pour mettre en place une station de test audio présentent un défaut majeur : elles ne disposent pas d'un filtre coupe-bande commutable sur l'entrée pour supprimer la composante de fréquence de test dans le signal de sortie de l'appareil audio testé. Mais pourquoi un filtre coupe-bande est-il si nécessaire ?

Optimiser avec un filtre coupe-bande

La façon la plus simple d'illustrer l'importance d'un filtre coupe-bande est de considérer une configuration de test (comme décrit dans l'article mentionné ci-dessus) destinée à mesurer la qualité de l'interface audio elle-même. Si vous connectez l'entrée et la sortie de l'interface (loopback) et générez un signal de test typique - généralement un signal sinusoïdal avec une fréquence de 1 kHz - vous pouvez visualiser les harmoniques dans le spectre de fréquences résultant. Malheureusement, avec cette disposition, il n'est pas possible de faire la distinction entre les harmoniques déjà présentes

dans le signal du générateur et les harmoniques ajoutées par l'équipement de test (par exemple, dans son étage de conversion A/N). Avec des niveaux d'harmoniques relativement élevés, comme ceux d'un étage de sortie audio utilisé au maximum, ce n'est pas vraiment un problème car il est clair que la majeure partie des harmoniques provient du circuit testé, et non du générateur de signaux ou de l'équipement de test. Cependant, lorsque vous voulez mesurer les caractéristiques de distorsion d'un bon préampli audio, les choses sont plus difficiles car la distorsion du dispositif testé a à peu près la même amplitude que celle de l'équipement de test.

Pour résoudre ce problème, l'équipement de test audio professionnel dispose d'un filtre coupe-bande avant l'étage d'entrée. Ce filtre atténue fortement l'amplitude du signal de test (c'est-à-dire sa fondamentale). La suppression de la fréquence du signal de test de la sortie de l'appareil testé élimine le problème de génération d'harmoniques par le circuit de traitement du signal dans l'équipement de test puisque ce dernier ne voit que les artefacts de signal ajoutés par l'appareil testé. Le niveau de ces artefacts est bien inférieur au niveau de la fondamentale du signal de test. Un filtre coupe-bande offre également un autre avantage important : une forte atténuation de la fréquence fondamentale du signal de test permet d'augmenter considérablement la sensibilité ou le gain de l'équipement de test, de sorte que les harmoniques de très faible amplitude et les composantes de distorsion, qui autrement ne seraient pas visibles (en raison de la résolution limitée du CA/N, par exemple), peuvent être mesurées. Si vous augmentez la sensibilité de l'équipement de test d'un facteur 10 avec le signal filtré et que le rapport signal/bruit de l'équipement de test est légèrement inférieur à 90 dB (typique pour un CA/N 16 bits), vous pouvez facilement mesurer les harmoniques et le bruit jusqu'à -110 dB. Pas mal, en fait.

Les filtres coupe-bande intégrés dans les équipements de test audio professionnels sont commutables, ce qui signifie qu'il est possible

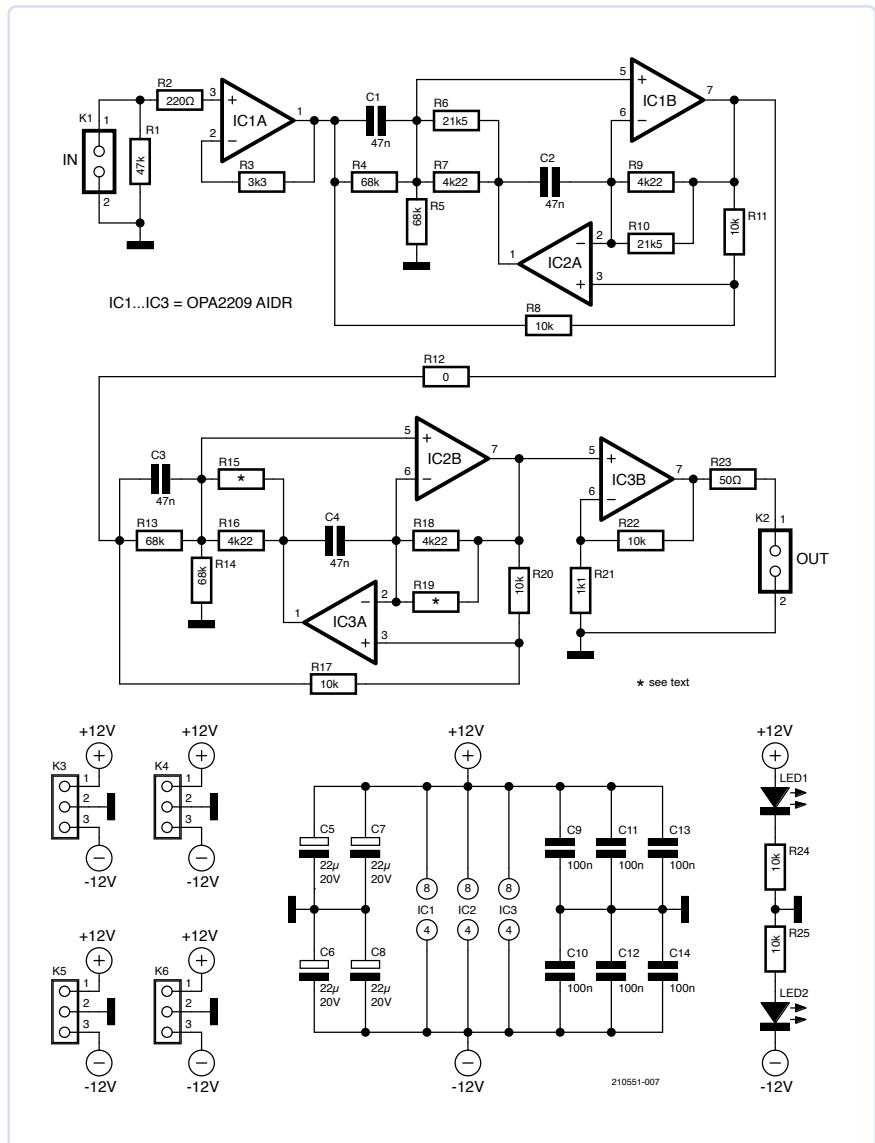


Figure 1. Le circuit du filtre coupe-bande n'a besoin que de trois ampli op (de haute qualité).

de régler la fréquence coupe-bande. Ces filtres sont généralement conçus de manière à ce que leur fréquence de filtrage suive automatiquement la fréquence du générateur, ce qui permet d'effectuer facilement des mesures sensibles à différentes fréquences. Comme on pouvait s'y attendre, de tels circuits de filtrage sont complexes et coûteux.

Exigences et limites

Un filtre coupe-bande adapté aux mesures audio devrait idéalement atténuer au maximum le signal de test (en pratique, de plus de 50 dB) tout en laissant passer les harmoniques sans les modifier. Puisque même la deuxième harmonique ne doit pas être significativement atténuée et qu'elle n'est que le double de la fréquence du signal de test, le filtre coupe-bande doit avoir un facteur Q élevé. Et, bien sûr, le circuit de filtrage doit être conçu de manière à ne pas générer ses propres harmoniques ou tout autre bruit significatif. Cela signifie que vous avez besoin de très bons amplificateurs opérationnels pour construire ce type de filtre, mais pour le moment, ils sont difficiles à trouver.

Pour maintenir le coût et la complexité d'un filtre coupe-bande fait maison dans des limites raisonnables, le filtre décrit ci-des-



sous n'a pas de fréquence réglable. En revanche, il possède une fonction supplémentaire indispensable pour une utilisation avec des interfaces audio USB, dont la plupart ne disposent pas de réglages de gain équilibrés : le signal de sortie est amplifié en interne d'un facteur 10 (20 dB). Cela facilite la mesure des composants de distorsion faible.

Circuit de filtrage

À ma connaissance, il existe deux formes d'implémentation adaptées à cet effet : le filtre coupe-bande de Fliege et le filtre à variable d'état. J'ai opté pour la version Fliege en raison de ses caractéristiques, et j'en ai branché deux en série pour obtenir une atténuation suffisante.

La figure 1 montre le circuit complet. L'ampli op IC1A sert de tampon au signal d'entrée, de sorte que le premier étage du filtre Fliege construit avec IC1B et IC2A est piloté par une source à faible impédance avec des conditions de signal définies. La sortie du premier étage du filtre est alimentée à travers la résistance R12 de $0\ \Omega$ (voir plus loin) vers le deuxième étage de filtre, qui a les mêmes valeurs de composants. IC3B amplifie le signal filtré de 20 dB. Si cela n'est pas souhaité, il est possible de réduire le gain à 1 en omettant R21 et en réduisant la valeur de R22 à $3,3\ k\Omega$.

Calcul et réglage

Pour faciliter les calculs, des instructions et un logiciel [2] sont disponibles en ligne. Le facteur

Q du filtre doit être réglé à 10 pour éviter une atténuation excessive de la deuxième harmonique. Un facteur Q plus élevé rendrait plus difficile la détermination des bonnes valeurs de composants, car la largeur de bande de gain limitée des ampli op devrait également être prise en compte. Dans tous les cas, le facteur Q est boosté par la mise en série des deux étages de filtrage.

Les résistances R4 et R5 avec R6 et R7 en parallèle (ou dans le deuxième étage de filtre R13 et R14 avec R15 et R16 en parallèle) déterminent le facteur Q du filtre. La formule pour déterminer le Q du premier étage est :

$$Q = R_4 / (2 \times R_6 || R_7)$$

sous la condition que $R_4 = R_5$ pour que le gain soit de 1. Le Q est proche de 10, car la valeur de $R_6 || R_7$ est d'environ $3,5\ k\Omega$.

Les condensateurs C1 et C2, ainsi que $R_6 || R_7$ et $R_9 || R_{10}$, ont les mêmes valeurs et déterminent la fréquence coupe-bande selon la formule :

$$f = 1 / (2 \pi R C)$$

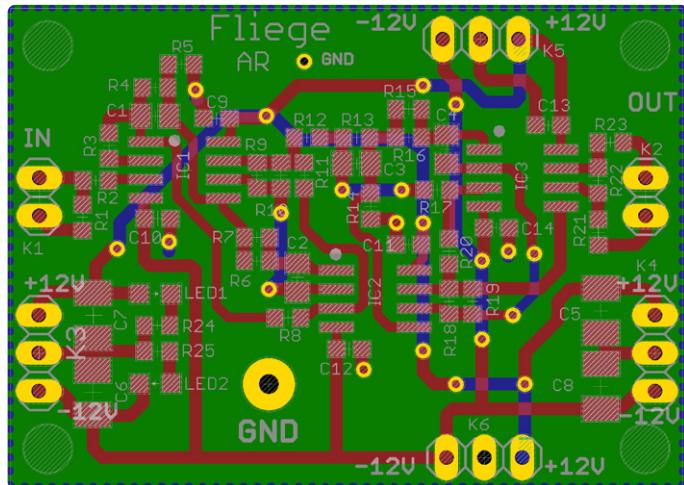


Figure 2. Le circuit imprimé est conçu pour les CMS, mais ils sont suffisamment grands pour permettre le soudage manuel.

Les résistances R8 et R11 ont également la même valeur. Le deuxième étage de filtrage a la même disposition que le premier. Les condensateurs C1 à C4 doivent avoir autant que possible la même valeur, pour cela vous devez les mesurer à l'aide d'un appareil de mesure LCR approprié. Si la valeur réelle diffère de la valeur calculée, la fréquence coupe-bande peut être affinée à l'aide des résistances parallèles R6 et R10 ou R15 et R19.

De plus, les deux étages de filtrage doivent non seulement être réglés sur la fréquence du signal de test, mais avoir aussi autant que possible la même fréquence de coupure. C'est là que R12 est utile : vous pouvez la retirer temporairement (ou ne pas la monter dans un premier temps) pour permettre aux deux étages de filtrage d'être réglés indépendamment.

Ensuite, prenez et mesurez le signal à la sortie de IC1B du premier étage. Le premier étage de filtrage peut être réglé sur la fréquence souhaitée avec R6 et R10. Une fois que les bonnes valeurs de résistance ont été déterminées par expérimentation, elles peuvent être ajustées.

Ensuite, le deuxième étage de filtrage doit être réglé. Pour cela, connectez son entrée (la jonction de C3, R12 et R13) temporairement à la sortie de IC1A et réglez la fréquence du filtrage avec des valeurs appropriées pour R15 et R19. Une fois que les fréquences coupe-bande sont suffisamment adaptées, vous pouvez retirer cette



Figure 3. Prototype du filtre assemblé par l'auteur.

connexion et ajouter R12. Les fréquences coupe-bande ne doivent pas nécessairement correspondre parfaitement.

Vous pouvez effectuer le réglage fin final avec les résistances R15 et R19 à l'aide d'un voltmètre audio en variant légèrement la fréquence du générateur. Une atténuation élevée de la fréquence cible est le signe d'un facteur Q global élevé et indique une bonne correspondance globale des fréquences coupe-bande des deux étages de filtre. Lorsque tout est satisfaisant, montez les résistances R15 et R19.

Qualité des circuits imprimés et des filtres

La **figure 2** montre la disposition du circuit imprimé. Les fichiers Eagle peuvent être téléchargés gratuitement à partir de la page Web d'Elektor de cet article [4]. La **figure 3** montre ma carte entièrement assemblée. Des plots de connexion pour les tensions d'alimentation 12 V sont prévus sur les quatre côtés. Cela permet de connecter facilement des cartes de filtrage en série ou de brancher un filtre sur une carte appropriée avec des régulateurs de tension pour former un sandwich de cartes comme indiqué sur la **figure 4**. D'ailleurs, la carte de filtrage et la carte d'alimentation combinées s'intègrent exactement dans un boîtier en aluminium Hammond de type 1550Q, comme illustré à la **figure 5**. La superposition des composants sur le circuit imprimé a été omise par souci de simplification.



LISTE DES COMPOSANTS

Résistances (CMS 0603, 1 %)

- R1 = 47 kΩ
- R2 = 220 Ω
- R3 = 3,3 kΩ
- R4,R5,R13,R14 = 68 kΩ
- R6,R10 = 21,5 kΩ
- R7,R9,R16,R18 = 4,22 kΩ
- R8,R11,R17,R20,R22,R24,R25 = 10 kΩ
- R12 = 0 Ω
- R15,R19 = voir texte
- R21 = 1,1 kΩ
- R23 = 50 Ω

Condensateurs

- C1,C2,C3,C4 = 47 nF, CMS 0805
- C5,C6,C7,C8 = 22 µF, 20 V, électrolytiques, SMC-B
- C9,C10,C11,C12,C13,C14 = 100 nF, CMS 0603

Semi-conducteurs

- LED1 = LED, rouge, CMS 0805
- LED2 = LED, verte, CMS 0805
- IC1...IC3 = OPA2209 AIDR, SO08

Autres

- K1,K2 = connecteur à 2 broches, pas de 0,1 pouce
- K3...K6 = connecteur à 2 broches, pas de 0,1 pouce
- Circuit imprimé*
- Circuit imprimé d'alimentation*
- Boîtier en aluminium Hammond 1550Q

* Voir texte

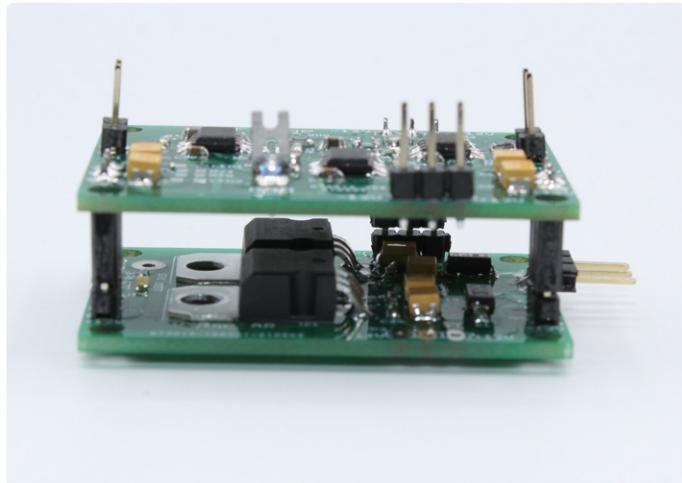


Figure 4. La carte du filtre branchée sur une carte de même taille équipée de régulateurs de tension.

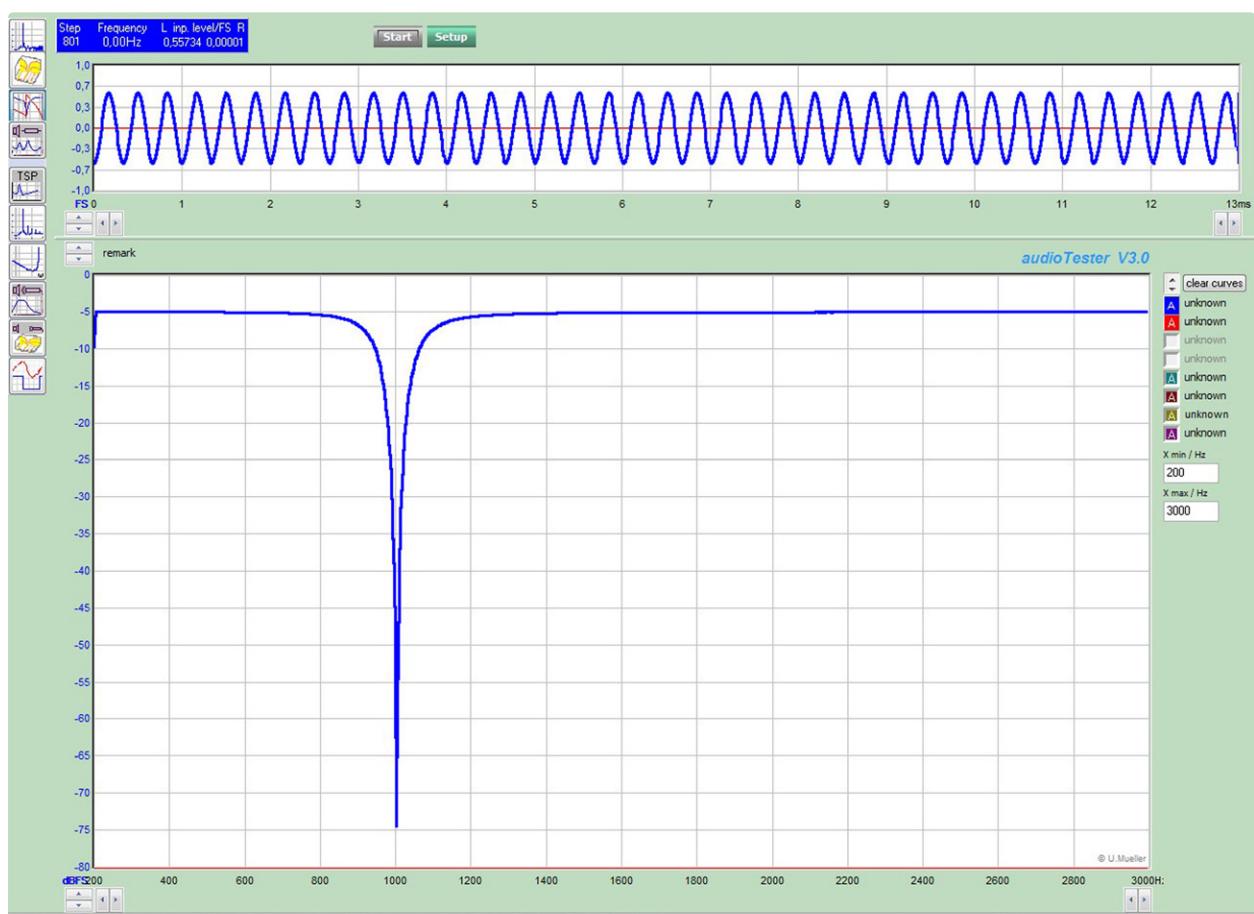


Figure 5. Le « sandwich » de circuits imprimés installé dans un boîtier en aluminium.

cité, mais les fichiers de configuration des circuits et des cartes au format Eagle peuvent également être téléchargés à partir de [4]. Il me reste encore quelques cartes nues, donc si ça vous intéresse vous pouvez me contacter par email (voir encadré). L'archive liée contient les fichiers de tous les circuits, y compris une version B de la carte d'alimentation que je n'ai pas encore testée.

La **figure 6** montre la réponse en fréquence du filtre coupe-bande

avec la fréquence centrale habituelle de 1 kHz. L'atténuation de près de 70 dB à 1 kHz est assez bonne pour l'usage prévu. J'ai généré un tracé du spectre (**figure 7**) avec un Audio Precision APx555 afin de vérifier la distorsion et la génération d'harmoniques du filtre coupe-bande. Compte tenu du coût et de l'effort, le résultat - avec un SNR de plus de 90 dB - est très respectable.



Out: 96000Hz float | Analog (3+4) (RME Babyface Pro)_o#2; In: 96000Hz float | Analog (3+4) (RME Babyface Pro)_i#2

Sweep .Setup: default

Figure 6. Réponse en fréquence du double filtre coupe-bande de Fliege. L'atténuation à la fréquence du signal de test est de près de 70 dB, ce qui est vraiment bon.

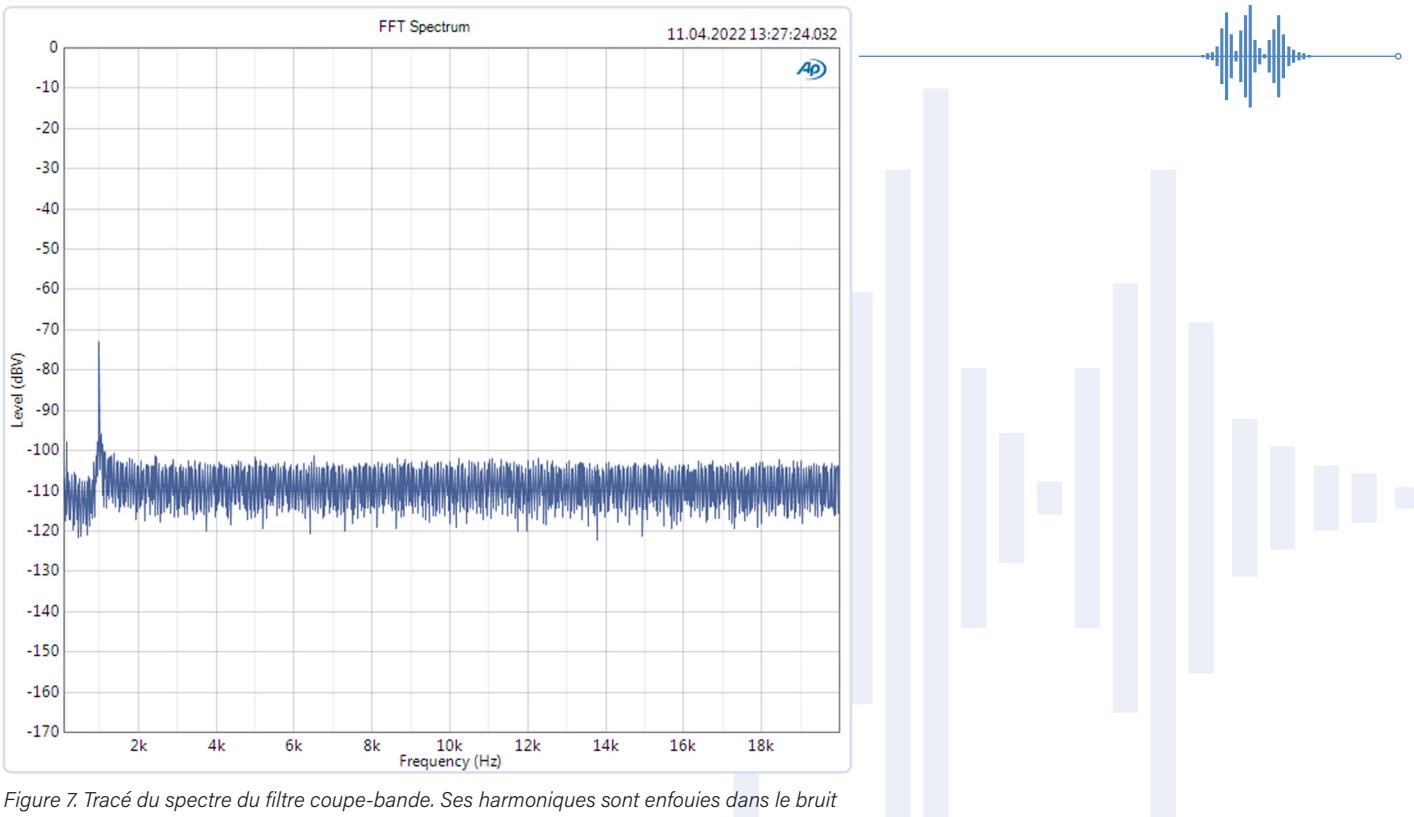


Figure 7. Tracé du spectre du filtre coupe-bande. Ses harmoniques sont enfouies dans le bruit de fond à -100 dB.

Utilisation

Pour établir un point de départ, vous devez d'abord utiliser un atténuateur commutable pour régler le niveau du signal à mesurer (sans le filtre coupe-bande) sur une plage de travail utilisable d'environ -5 à -10 dBFS (décibel par rapport à la pleine échelle) de l'équipement de test audio ou de l'interface audio USB concernée et notez ce niveau. Connectez ensuite le filtre coupe-bande en avant de l'entrée instrument. Ajustez légèrement la fréquence du générateur pour minimiser le niveau de la fondamentale de ce signal tel qu'enregistré par l'instrument ou l'interface audio. Ensuite, mesurez les niveaux des harmoniques. Le gain de IC3B doit être soustrait des niveaux d'harmoniques mesurés dans ce spectre. Par exemple, avec un gain de dix, une valeur mesurée de -80 dB devient -100 dB. Si l'instrument ou l'interface audio dispose d'un réglage de gain étalonné ou étalonnable, vous pouvez encore augmenter le gain global à des fins spécifiques afin de mesurer des niveaux de signal extrêmement bas.

Pour être sûr d'effectuer des mesures significatives avec le filtre coupe-bande, vous devez garder à l'esprit que de bonnes mesures ne sont possibles que si le signal du générateur présente la distorsion et le bruit les plus faibles possibles. Dans certains cas, il est nécessaire de connecter un filtre passe-bas à bande étroite après le générateur afin d'obtenir un très bon signal de test. ↗

210551-04

À propos de l'auteur

Alfred Rosenkränzer a travaillé pendant de nombreuses années en tant qu'ingénieur de développement. Depuis la fin des années 1990, il développe des circuits numériques et analogiques à grande vitesse pour les testeurs de circuits intégrés. L'audio est son passe-temps personnel.

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (alfred_rosenkraenzer@gmx.de), ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



PRODUITS

- **Joy-IT JDS2915 Signal-Generator (15 MHz)**
www.elektor.fr/19169
- **Elektor Audio Collection (USB Stick)**
www.elektor.fr/19892
- **D. Self, Small Signal Audio Design (2nd Edition)**
www.elektor.fr/18046

LIENS

- [1] A. Rosenkränzer, « testeur audio bon marché », Elektor 7-8/2022: www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-267/60598
- [2] Calculateur de filtre coupe-bande 1: <https://earmark.net/gesr/opamp/notch.htm>
- [3] Calculateur de filtre coupe-bande 2: <https://tinyurl.com/yc2wj73v>
- [4] Fichiers de disposition du circuit imprimé: www.elektormagazine.fr/210551-04