

électronique analogique

Étude de cas n° 1 - section 2 : Préamplificateur optimisé pour les microphones MEMS

Ton Giesberts (Elektor Labs)

Dans cette série d'articles, des experts de l'électronique analogique en éclairent divers aspects susceptibles de profiter à des lecteurs nés dans le numérique. En effet, l'analogique n'est pas de la magie noire. Dans la première section de cette étude de cas, nous avons parlé du microphone MEMS utilisé pour la première fois dans un projet d'Elektor appelé *Bat Detector^{PLUS}*.

Approfondissons avec l'ampli de micro plutôt raffiné de ce projet.

Cet article d'une série sur la *conception électronique analogique* fournit une évaluation documentée et commentée du préamplificateur de microphone original utilisé dans le détecteur de chauves-souris *Bat Detector^{PLUS}* [1]. L'auteur discute des solutions pour l'optimiser pour le microphone MEMS examiné dans la section 1 de cette étude de cas [2]. Pour bien suivre, il convient de se référer au schéma de circuit du préamplificateur de microphone mentionné ; c'est la partie surlignée de la **fig. 1**. Nous reproduisons délibérément le schéma complet du *Bat Detector^{PLUS}* pour bien montrer comment le préamplificateur est :

- relié au microphone (K1) ;
- chargé (par IC4A) ;
- alimenté (symétriquement sous $\pm 4,5$ V par IC1).

Finalement, l'amplificateur opérationnel de faible puissance TL062 fait encore bonne figure avec ses 200 μ A de courant d'alimentation par amplificateur au repos. Ce n'est pas mal comparé à de nombreuses versions de faible puissance actuelles, disponibles presque exclusivement comme CMS (toujours plus minuscules !), mais il y en a maintenant de bien meilleurs. Son produit gain-bande passante (GBW) de 1 MHz est la pierre d'achoppement de ce circuit, puisqu'il impose un facteur d'amplification de 1845. Si dans le gain total nous incluons les 400 Ω du micro MEMS, la bande passante avec un seul ampli op serait de 540 Hz. Pour élargir cette bande passante, il faut plusieurs amplificateurs successifs, trois exactement, chacun avec moins d'amplification et donc plus de bande passante. Cela implique une augmentation de la consommation d'énergie dont on peut se demander si elle est justifiée si on la compare à celle d'un ampli op beaucoup plus rapide. Il existe des amplis ultrarapides comme l'OPA2889 à deux étages avec un produit gain-bande passante de 75 MHz et un facteur 20 d'amplification pour une consommation de 0,92 mA pour les deux amplificateurs. Mais revenons au nombre d'amplis op nécessaires. C'est difficile à calculer, car la bande passante par amplificateur peut ne pas correspondre à celle d'un filtre passe-bas de premier

ordre. Plus il y aura d'amplificateurs en série, plus la bande passante sera réduite comparée à celle d'un ampli unique. Par commodité, considérons que la réponse est celle d'un réseau *RC* de premier ordre. Cela vaut aussi pour des étages de filtrage similaires déterminant la limite inférieure ; plus d'étages signifie une fréquence de coupure plus haute pour la limite inférieure de la bande. Pour un filtre *RC* passe-haut du premier ordre, la fonction de transfert est :

$$j\omega RC / (1 + j\omega RC) \quad (1)$$

En raison de la rotation des phases, la distribution réelle de la tension est :

$$\omega RC / \sqrt{1 + (\omega RC)^2} \quad (2)$$

Pour le point de coupure, cela équivaut à $1/\sqrt{2}$. C'est le fameux point -3 dB point, que les tatillons noteront :

$$20 \log 1/\sqrt{2} = -3,0103$$

Nous voulons la largeur de bande réelle lorsque plusieurs étages seront en série. Au lieu de $1/\sqrt{2}$, on prend le facteur x . En réorganisant, on obtient :

$$\omega RC = x / \sqrt{1 - x^2} \quad (3)$$

Par exemple, pour un point de -3 dB, entrez la valeur $1/\sqrt{2}$ pour x , ce qui donne 1 exactement et la formule standard bien connue pour la fréquence de coupure à -3 dB :

$$f = 1 / (2nRC) \quad (4)$$

Nous voulons le nouveau point de coupure s'il est connu d'un étage. Prenons trois étages comme dans le circuit. Nous devrions trouver la fréquence à laquelle l'atténuation est de

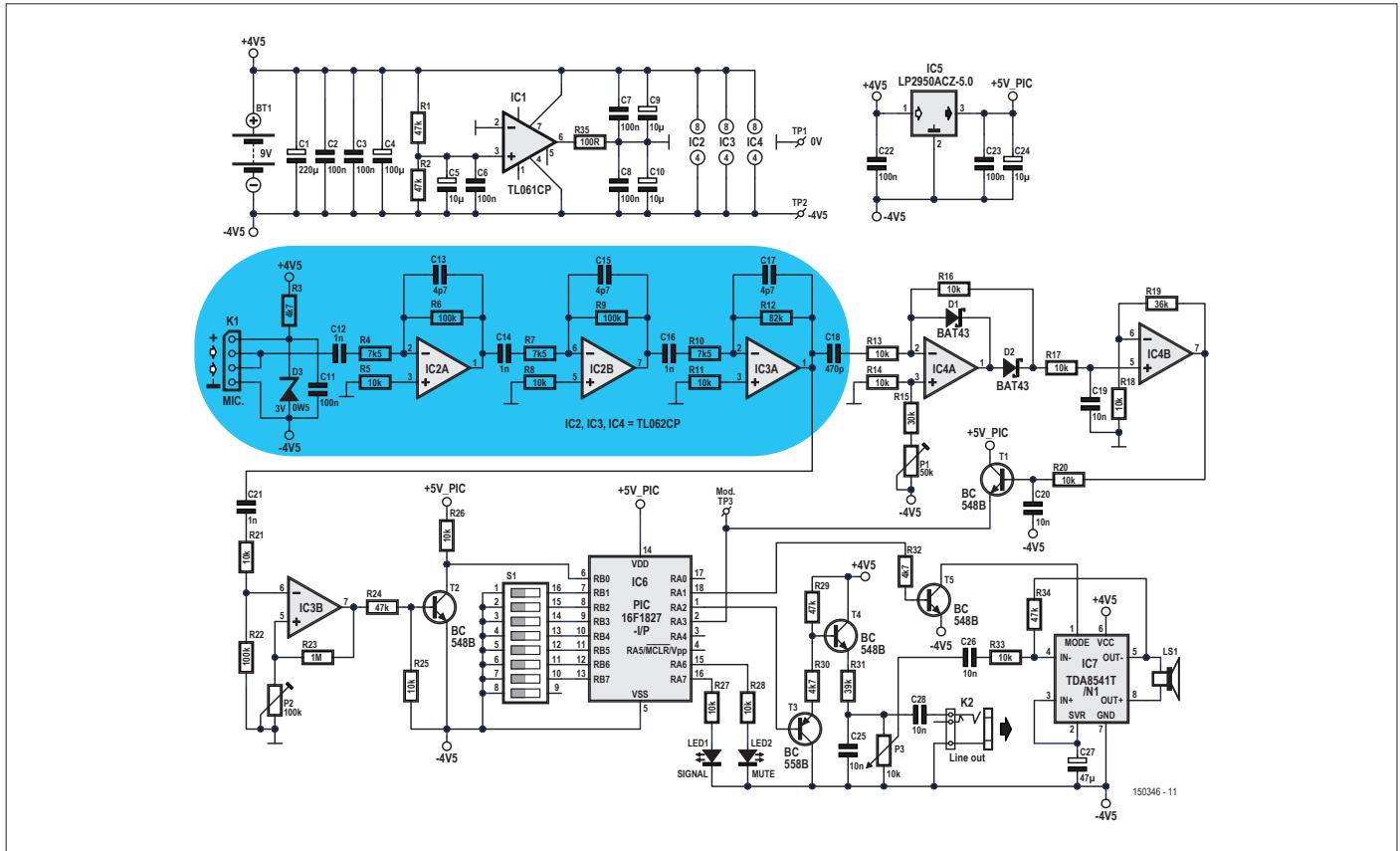


Figure 1 : Circuit complet du détecteur Bat Detector^{PLUS} avec le préamplificateur de microphone à 3 étages en surbrillance.

1 dB. Par commodité, nous ne prenons pas $-3,0103/3$ mais seulement -1 . De $20\log x = -1$ il s'ensuit que :

$$x = 10^{(-1/20)} \quad (5)$$

L'atténuation à trouver pour le point à -1 dB s'établit alors à 0,891251.

En l'entrant dans l'équation 3, ωRC est égal à 1,96523. Par conséquent, pour trois étages égaux, le nouveau point de coupure sera presque deux fois plus élevé. Dans le cas d'un filtre passe-bas, le point de coupure est alors presque deux fois plus bas. Pour n étages, on aura :

$$x = 10^{((-3/n)/20)} \quad (6)$$

Dans le cas du TL062, un gain de 13,3 fois (c'est-à-dire 100/7,5) pour l'étage médian, signifie un point de coupure à 75 kHz. Le condensateur supplémentaire de 4,7 pF dans la boucle de rétroaction abaisse encore la fréquence de coupure à environ 60 kHz par étage et modifie la réponse en fréquence à un ordre supérieur.

D'abord simuler...

... avant de dessiner un PCB ou de construire un proto sur plaque d'essais. Ne serait-ce que pour s'assurer qu'il y a assez

étages et qu'il n'y a rien d'autre à corriger. Souvent, la simulation est plus rapide que les calculs. La simulation du préampli a montré que sa bande passante finale allait de 23 kHz à 58 kHz. Pas assez pour les chauves-souris ! Sur notre proto, la limite supérieure était même légèrement inférieure à environ 44 kHz, à cause probablement des tolérances des amplis op, et de la tension d'alimentation plus basse que celle que prévoit la fiche technique pour le GBW : soit une valeur **typique** de 1 MHz pour un TL062 ; max et min non spécifiés. La réponse de chaque étage n'est probablement pas non plus purement du premier ordre.

Combien d'étages alors...

... si on utilise ce bon vieux TL062 ? Il est recommandé de ne pas laisser la limite de l'ampli op déterminer la largeur de bande souhaitée, car le produit gain-bande passante GBW de l'ampli op peut présenter des dispersions considérables. Les effets tout aussi négatifs sur la distorsion et l'intermodulation ne posent pas vraiment de problème ici. Il est préférable que cette limite soit sensiblement plus élevée que nécessaire avant le filtrage, disons un facteur de 2, de préférence 3, et que l'on laisse un condensateur dans le circuit de rétroaction fixer la largeur de bande souhaitée.

Où cela nous mènera-t-il ? La limite supérieure de la bande passante effective de l'ampli op – et par conséquent le gain

maximal inférieur réglable par étage – a naturellement un impact sur le nombre d'étages requis. Si nous restons prudents en retenant une largeur de bande 3 fois plus étendue, l'amplification par étage ne devrait pas dépasser :

$$1 \text{ MHz} / 360 \text{ kHz} = 2,78 \text{ fois.}$$

Intuitivement, cela signifie que beaucoup d'étages seront nécessaires ! Appelons A l'amplification par étage (arrondie à 1850) et n le nombre d'étages. Nous aurons :

$$A^n = 1850 \quad (7)$$

Pour trouver n nous écrivons :

$$n = (\log 1850) / (\log A) \quad (8)$$

En substituant 2,78 à A , alors n est égal à 7,36. Dans ce cas, au moins huit étages sont nécessaires, ou deux amplis op quadruples, c'est-à-dire des TL064 avec une consommation de courant totale de 1,6 mA. Ce n'est pas très pratique et l'utilisation d'un ampli op (double) plus rapide semble être un bien meilleur choix, surtout eu égard au nombre de composants et à leur encombrement sur le circuit imprimé. L'avantage du plus grand nombre d'amplis op est un éloignement physique plus grand entre le signal de sortie relativement élevé et l'entrée de l'amplificateur, ce qui réduit le risque d'oscillations causées par un couplage parasite. Avec l'ampli op CMS rapide, les autres composants seront de préférence montés en surface également. Le couplage parasite avec le microphone n'a aucun effet, car ce composant est blindé. Au pire, l'effet peut se produire sur les connexions telles que les connecteurs et les câbles vers et depuis les circuits imprimés.

Recherché : bande passante !

Pour vérifier, la largeur de bande théorique peut être recalculée. Avec huit étages, il faut moins de gain par étage. Dans le cas de n étages, l'amplification par étage est :

$$A = \sqrt[n]{1850} \quad (9)$$

Avec huit étages, l'amplification nécessaire par étage n'est que de 2,561 fois. L'équation 6 donne 0,95775 pour x . En utilisant l'équation 3, vous pouvez calculer que le nouveau point de coupure se décale d'un facteur de 3,33. Ainsi, la nouvelle fréquence de coupure attendue, sans condensateur dans le circuit de retour, devient :

$$1000 / (2,561 \times 3,33) = 117,3 \text{ kHz.}$$

Ce n'est pas la largeur de bande souhaitée, pourtant nous sommes passés de trois à huit étages. Cela ne suffit pas pour les raisons mentionnées. Dans une simulation avec 7,5 kΩ à l'entrée et 19,2075 kΩ pour la rétroaction (pour une amplification théorique de 2,561), huit étages en série donnent une

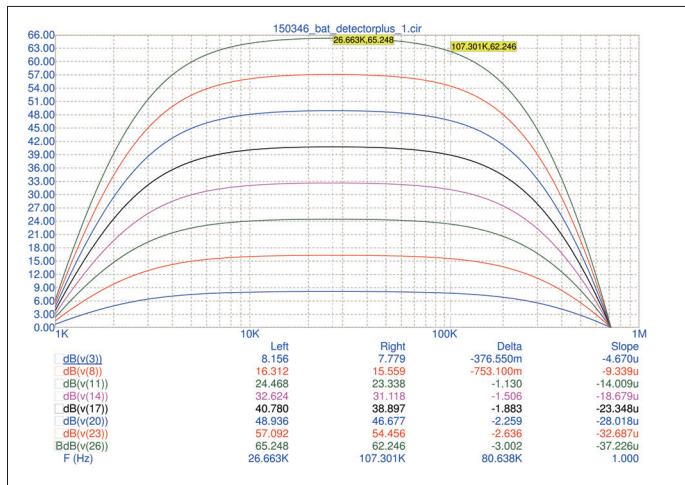


Figure 2 : Le graphique montre l'effet de huit amplificateurs identiques en série (source = 0 Ω).

bande de 107,3 kHz, comme le montre la **fig. 2**. Ce n'est pas la meilleure solution. De plus, le condensateur de couplage de 1 nF doit être ajusté ; si nous tenons vraiment à 10 kHz, cela donnerait une valeur tordue de 7 nF. Avec une valeur standard de 10 nF, la fréquence de coupure basse sera de 6,6 kHz. Une autre approche pourrait être : un ou plusieurs amplis op rapides et des filtres actifs comme amplificateur, avec p. ex. une caractéristique de Butterworth ou de Tchebychev.

Rapport signal/bruit

Pour le rapport signal/bruit, cette approche ne sera pas fameuse, car ce sont les premiers étages qui font la loi. À l'entrée, un ampli non-inverseur aurait peut-être été préférable. Il n'y aurait pratiquement pas d'atténuation en raison de la résistance d'entrée, de sorte que les résistances dans la contre-réaction du premier étage pourraient être considérablement plus faibles, ce qui est bon pour le rapport signal/bruit et la dynamique.

La résistance de sortie maximale du microphone MEMS utilisé est de 400 Ω. Avec un micro à électret, la résistance est encore plus forte. La réponse en fréquence n'a pas été adaptée au micro. La plupart des fabricants ne spécifient la réponse en fréquence qu'en dessous de 20 kHz, souvent ça ne va que jusqu'à 10 kHz, or c'est justement cette information-là qu'il nous fallait ! L'idéal serait de la mesurer soi-même, mais une précision absolue n'est pas nécessaire – on peut se contenter d'une comparaison avec la réponse connue d'une source d'ultrasons à large bande. Ne compliquons pas les choses...

À suivre

La section 3 de cette étude de cas sera publiée dans le prochain d'Elektor. Il abordera d'autres défis et solutions intégralement analogiques : la dynamique du préampli, le bruit d'entrée, les courants de polarisation de l'ampli et la modélisation des microphones à 2 et 3 broches.

Restez à l'écoute. ▶

(191230-04 VF)

Liens

- [1] détecteur de chauve-souris Bat Detector^{PLUS} : www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-201611/39913
- [2] électronique analogique (1) : www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-145/57082