

0. 目標：声に“ズーム”するマイクを作りたい

やりたいことはシンプルです：

カメラのズームみたいに、前方の声だけを強烈に拾って、横や後ろはできるだけ落としたい。

しかも今回は

- MEMS マイク（例：ICS-40800）を 2 個
- 間隔 D だけ離して並べる
- 電気回路（RC）で“遅延補償”を入れる

という、電氣的にショットガン効果を作る構成です。

1. 2個マイクを離して置くと、なぜ指向性が出るのか？

まずはごく簡単なモデルから。

1-1. 二つの位置で同じ音を聞く

- 前から平面波が来ると、**前側マイク**にはちょっと早く、**後側マイク**には少し遅れて音が届きます。

この「到達時間の差」がポイント。

距離を D 、音速を c とすると、後ろマイクに届くのが遅れる時間は

$$t_{ac} = \frac{D}{c}$$

(ac = acoustic)

例えば $D=1\text{cm}$, $c=340\text{m/s}$ なら $t_{ac} \approx 29\mu\text{s}$ （マイク間で約 29 マイクロ秒ずれる）。

1-2. 2つのマイクの信号を「差分」するとどうなる？

- 前のマイク: $(x_{\text{front}}(t))$
- 後ろのマイク: $(x_{\text{rear}}(t))$

とすると、差分

$$s(t) = x_{\text{front}}(t) - x_{\text{rear}}(t)$$

を取ると、音圧の“空間勾配”に相当する信号になります。

ざっくりいうと：

- 音が前から来たとき → 差が大きくなる
- 横から来たとき → 2つのマイクにほぼ同時に届いて差が小さい
- 後ろから来たとき → 符号が逆になる

この「差分」は、理想的には $\cos\theta$ （一次傾度）や $\cos^2\theta$ （二次傾度）みたいな角度パターンを持ちます。

- 1個の（圧力勾配）マイク → figure-8 ($\cos\theta$)
- 2つの勾配をうまく組み合わせる → $\cos^2\theta$ （もっと鋭いローブ）

までいける、というのが二次傾度マイクの基本アイデア。

2. でも現実には“位相のズレ”で理想から崩れる

ここからが今日の本題。

2-1. 周波数が上がると「時間差」が「位相差」に変わる

周波数 f の正弦波だと、角周波数 $\omega = 2\pi f$ です。

マイク間の時間遅れは $t_{ac} = D/c$ なので、位相差は

$$\Delta\phi(\omega) = \omega \frac{D}{c}$$

- 低い周波数（波長が長い） → $\Delta\phi$ が小さくて、差分 \approx “微分” と見なせる

- 高い周波数 → $\Delta\phi$ が大きくなって、理想的な $\cos\theta / \cos^2\theta$ からズレる → 副ローブが出たり、音が変になる

なので「ある周波数帯だけちゃんと整えてあげる」必要が出てきます。

2-2. “声の帯域” だけキレイに合ってればいい

ショットガンマイクの目的は、

全帯域で完璧に指向性を作ることではなく、**人の声の明瞭度帯域（だいたい2~6kHz）だけ**めっちゃくちゃ指向性を鋭くすること。

です。

だから：

- 低域（～500Hz）は無指向でもいい
- 中域（2～6kHz）はビームのように前だけ拾えればいい
- 超高域は多少乱れてもあまり気にならない

→ この“声帯域の位相”だけ合わせにいくのが、今日の「遅延補償」のアイデアです。

3. 電気回路で“遅延”を作る：RC ローパス

マイク間の音速遅延 t_{ac} に対して、電氣的に似たような遅延を作りたい。

そこで登場するのが **RC ローパスフィルタ**：

- R の後ろに C を GND に落とす、よくある一段ローパス。

3-1. RC ローパスの周波数特性

振幅特性：

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

位相特性：

$$\phi(\omega) = -\arctan(\omega RC)$$

さらに、その「群遅延」(信号の時間遅れ感)は

$$\tau_g(\omega) = \frac{RC}{1 + (\omega RC)^2}$$

- 低い周波数 → 遅延 $\approx RC$
- 高い周波数 → 遅延がだんだん小さくなる
- $\omega RC \approx 1$ あたりで遅延が一番大きい

という形をしています。

4. 設計の核心：声の中心周波数で「音速遅延」と「RC遅延」を揃える

ここが今日のハイライトです。

やりたいことは：

ある中心周波数 (f_0) (例: 3kHz) で音速による遅れ D/c と、RC フィルタの群遅延 $\tau_g(\omega_0)$ を一致させる。

つまり、

$$\tau_g(\omega_0) = \frac{D}{c}$$

ここで $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。

4-1. 数式で書く

群遅延の式：

$$\tau_g(\omega) = \frac{RC}{1 + (\omega RC)^2}$$

これを ω_0 で評価して、音速遅延 D/c と等しくします。

$$\frac{RC}{1 + (\omega_0 RC)^2} = \frac{D}{c}$$

未知数は C (R と D , f_0 は設計パラメータとして与える) です。

4-2. C に関する 2 次方程式になる

上の式を C について整理すると、

$$\left(\frac{D}{c}\omega_0^2 R^2\right) C^2 - RC + \frac{D}{c} = 0$$

という形の C に関する 2 次方程式になります。

- $a = (D/c)\omega_0^2 R^2$
- $b = -R$
- $d = D/c$

として

$$aC^2 + bC + d = 0$$

解の公式で C を解けばよいですが、ここでは「どういう流れで設計値が出るか」が目的なので、次は実際に **具体的な数値** を入れてみます。

5. 実際の設計例: $D=0.9\text{cm}$, $f_0=3\text{kHz}$, $R=338\Omega$ のとき

5-1. パラメータを決める

- 声にズームしたい \rightarrow 中心周波数 $f_0 \approx 3\text{kHz}$
- マイク間距離はできるだけ短くしたいが、実装・精度的に 0.9cm くらいが現実的 $\rightarrow D = 0.009\text{m}$
- 抵抗 R は回路の都合で 338Ω (ICS-40800 のデータシートにある出力インピーダンスの値)

音速は $c \approx 340\text{m/s}$ とします。

音速遅延:

$$t_{\text{ac}} = \frac{D}{c} = \frac{0.009}{340} \approx 2.65 \times 10^{-5} \text{ s}$$

(約 $26.5 \mu\text{s}$)

角周波数:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \cdot 3000 \approx 18850 \text{ rad/s}$$

5-2. 設計式に代入して C を解く

さきほどの 2 次方程式:

$$\left(\frac{D}{c}\omega_0^2 R^2\right)C^2 - RC + \frac{D}{c} = 0$$

ここに D, c, ω_0, R を入れて解くと、

$$C \approx 1.47 \times 10^{-7} \text{ F}$$

つまり、

$$C \approx 150 \text{ nF} = 0.15 \mu\text{F}$$

という値が出てきます。

これが「 $D=0.9\text{cm} \cdot f_0 \approx 3\text{kHz}$ 」のときの最適 RC 容量です。

(同じ式からもう一つ解 $\approx 167\text{nF}$ も出ますが、群遅延カーブの“反対側”の解で、ローパスとして扱いづらいので実用上は 150nF 付近を使うのが自然です。)

6. 実際に起きること: 本当に“声だけズーム”する

この $C \approx 150\text{nF}$ ($0.15\mu\text{F}$) を入れてみると、実際の挙動はどうなるか?

6-1. 周波数ごとのゲイン

この RC ($338\Omega + 0.15\mu\text{F}$) のカットオフは約 3.1kHz 。

- $100\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$: ほぼ減衰なし (-0.1dB 以下)
- 2kHz : -1.5dB 前後
- 3kHz : -2.8dB 前後

- 6kHz: $-6 \sim 7\text{dB}$
- 10kHz 以上: もっと落ちる

つまり:

- 低域はあまり削らない
- 2 ~ 4kHz あたりにちょうど強い位相遅延が乗る
- それより上はゲインも落ちていく

6-2. 位相・遅延の意味

- $f_0 \approx 3\text{kHz}$ 付近で 電氣的な遅延 $\tau_g(\omega_0)$ がちょうど D/c と一致
- この帯域で 2つのマイクの信号が「勾配マイク+遅延補償」として最もキレイに差分合成される
- 結果として 二次傾度 ($\cos^2 \theta$) 成分が最大化される

→ ここが「声がズームする帯域」です。

7. 距離 D と C の “役割分担”

設計の感覚としてはこう整理できます。

● D（マイク間距離）の役割

- 小さいほど
 - 微分近似が良くなり、理想的な傾度パターンに近づく
 - ただし差分の量が減るので、あまり小さすぎると“効き”が弱くなる
- 大きいほど
 - 傾度成分が強くなる（差が大きくなる）
 - でも高域で位相がグチャグチャになって、副ローブが増えたり破綻する

今回の結論としては:

「声用の二次傾度」を電氣的に補償して使うなら $D \approx 0.9\text{cm}$ 前後がちょうどいい。

● C (RC 容量) の役割

- 小さい C (例: 10nF) → 可聴帯域ではほとんど遅延にならない (f_c が数十 kHz) → ほぼ「遅延補償なし」と同じ
 - 中程度 (100nF ~ 150nF) → 2 ~ 6kHz で強い遅延 → 声がズームする帯域がちょうどここ → 「声専用ショットガン」的挙動
 - 大きい (220nF など) → さらに強烈な中域ビーム → かなりニッチ用途だけど、「極端な声ズーム」には向く
-

8. 実用的な設計レシピとしてまとめると

初めての人にもわかる形で、「こう考えれば設計値が出せる」というレシピにするとこんな感じです。

ステップ 1: 狙いたい帯域 (f_0) を決める

- 「声にズームしたい」なら $f_0 \approx 3\text{kHz}$ がちょうどいい (声の明瞭度・子音のピーク帯域)
-

ステップ 2: マイク間距離 D を決める

- 勾配近似が成り立つ範囲で、できるだけ小さくしたい
- 1段の RC で遅延補償可能な上限がほしい

$$D \lesssim \frac{c}{2\omega_0}$$

- $f_0 = 3\text{kHz}$, $c = 340\text{m/s}$ のとき → $D \lesssim 0.9\text{cm}$

→ なので $D \approx 0.9\text{cm}$ を設計値に選ぶ。

📐 ステップ 3: 回路の抵抗 R を決める

- 実際の回路構成（ゲイン・ノイズ・インピーダンス）から R を決める
 - ここでは例として $R = 338\Omega$ を採用（あなたの基板の値）
-

🧠 ステップ 4: 遅延補償条件 $\tau_g(\omega_0) = D/c$ から C を求める

- 群遅延式:

$$\tau_g(\omega_0) = \frac{RC}{1 + (\omega_0 RC)^2} = \frac{D}{c}$$

- これを C について解く（2次方程式）
- $f_0 = 3\text{kHz}$, $D = 0.009\text{m}$, $c = 340$, $R = 338\Omega$ を代入

→ 計算すると

$$C \approx 1.47 \times 10^{-7} \text{ F} \approx 150 \text{ nF}$$

→ 部品としては $0.15\mu\text{F}$ (150nF) を使う。

🔊 ステップ 5: 実際に差動合成+RC を組んで試聴する

- $D = 0.9\text{cm}$ の位置にマイク 2つ
- 片側に RC ($338\Omega + 150\text{nF}$) を通す
- 2つの出力を差動（片方を反転+ミックスでもOK）

→ 結果として、「声だけがズームして聞こえるショットガン特性」が得られる。

（あなたが実際に「製品レベルのショットガンみたい」と感じた状態ですね）

9. ざっくり一言でまとめると

「声にズームするマイクを作る」というのは、声の中心周波数 f_0 で、
・マイク間の音速遅延 D/c と
・RC フィルタの群遅延 $\tau_g(\omega_0)$ を一致させる設計問題。

そのプロセスは:

1. f_0 (狙う声帯域) を決める
2. D を小さめに決める (ここでは 0.9cm)
3. 回路上の R を決める
4. $\tau_g(\omega_0) = D/c$ の式から C を解く \rightarrow だいたい 150nF
5. 実際に組むと、本当に声だけズームする指向性になる

という流れです。