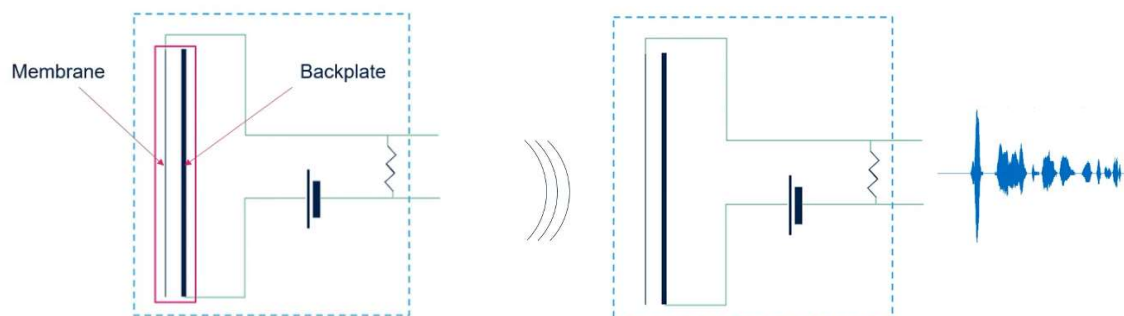


## 4. STM32F4 MEMS mikrofono signalo priėmimas

### Mikrofono veikimo principai



1 pav. Kondensatorinio mikrofono veikimo principas

Mikrofonas – tai keitiklis, paverčiantis garso slėgį elektros signalu (kintamos įtampos).

- Lygiagretus plokštelinis kondensatorius su judančia plokšte (membrana) ir fiksuota (galine plokšte)

- Garso slėgis priverčia membraną judėti

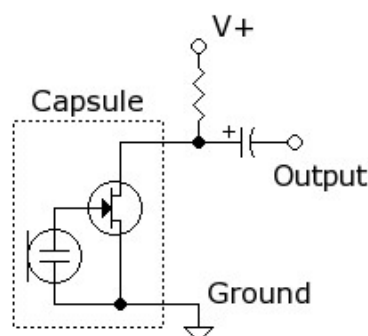
- Bendras įkrovimas yra pastovus, todėl kintama talpa sukuria kintamos įtampos signalą

Talpinis mikrofono veikimo principas yra bendras visų tipų mikrofonams, skiriasi jų gamybos technologija.

### ECM (*angl. electret condenser microphone*) – elektretinis kondensatorinis mikrofonas

Pagrindinės savybės:

- Sudarytas iš diskretinių elementų
- Kintamos talpos kondensatorius su elektretu (t.y. viena plokštelė padengta elektretu, ilgai išlaikančiu poliarizaciją), tranzistorius, skirtas sustiprinti kondensatoriaus įtampą
- Analoginis signalas, kuris turi būti vėliau apdorojamas ir filtruojamas



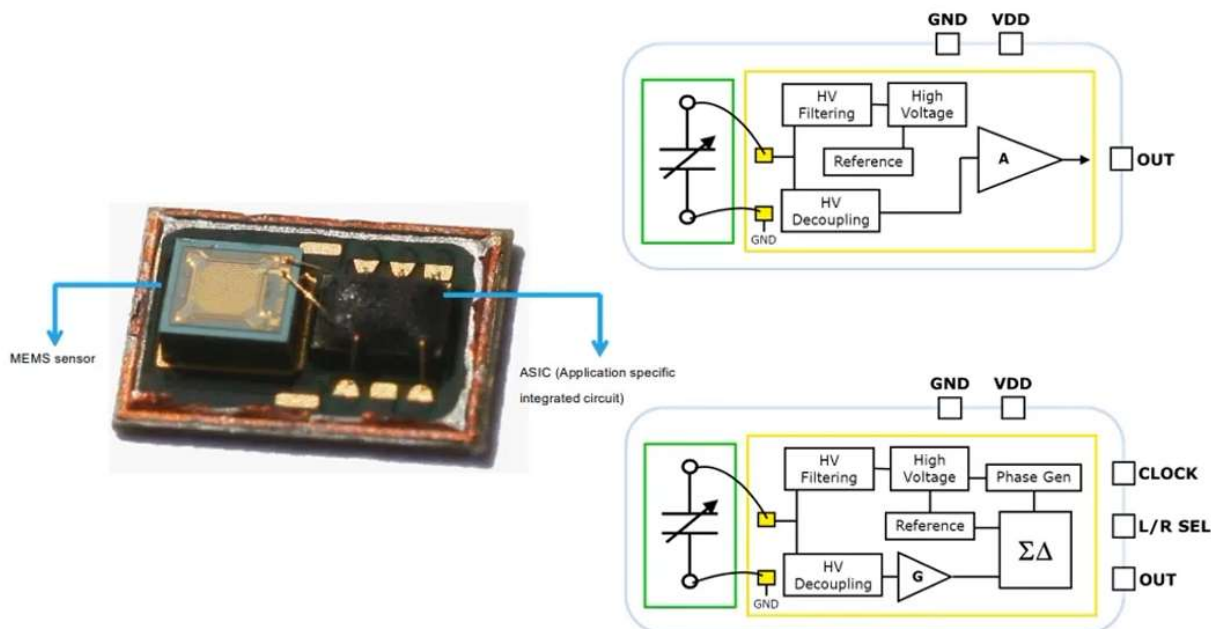
2 pav. ECM mikrofonas

Tipinio elektretinio mikrofono pirminio stiprintuvo grandinėje naudojamas lauko (FET) tranzistorius. Dviejų išvadų elektretinėje kapsulėje sumontuotas kintamos talpos kondensatorius bei tranzistorius, kapsulė turi būti maitinamas iš išorės maitinimo įtampa  $V+$ . Rezistorius nustato stiprinimo laipsnį ir išėjimo varžą. Garso signalas nuskaitomas išėjime, po nuolatinės srovės blokavimo kondensatoriaus.

### MEMS (*angl. micro-electro-mechanical systems*) mikrofonas:

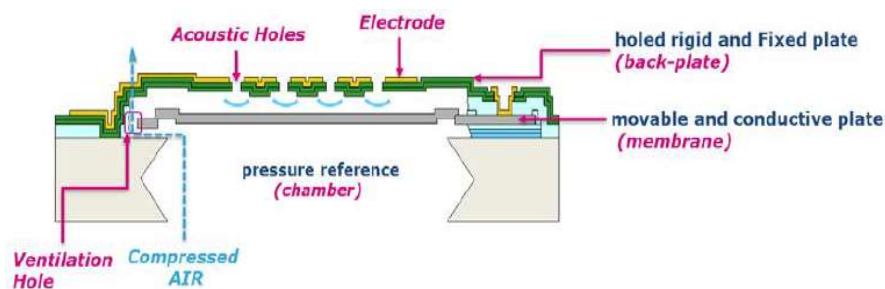
Pagrindinės savybės:

- Plona membrana sudaryta MEMS gamybos proceso metu
- Integruota ASIC
- Galimas analoginis arba skaitmeninis išėjimo signalas



**3 pav.** MEMS mikrofonas: kairėje – nuotrauka; dešinėje – principinė schema su analoginiu arba skaitmeniniu išėjimo signalu

MEMS mikrofonas susideda iš dviejų komponentų – jutiklio ir integrinio grandyno.



**4 pav.** MEMS keitiklio mechaninės specifikacijos

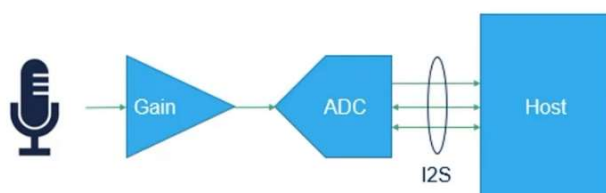
Jutiklis naudoja MEMS technologiją (*angl. Micro-Electrical-Mechanical Systems*) ir iš esmės yra silicio kondensatorius. Kondensatorius susideda iš dviejų silicio plokščių/paviršių. Viena plokštė yra fiksuota, o kita yra kilnojama (atitinkamai žalia ir pilka, parodyta 4 pav.). Fiksuotas paviršius yra padengtas elektrodu, kad jis būtų laidus, ir yra pilnas akustinių skylių, leidžiančių garsui prasiskverbti. Kilnojama plokštė gali judėti, nes ji yra sujungta tik vienoje konstrukcijos pusėje. Vėdinimo anga leidžia išeiti galinėje kameroje suspaustam orui ir dėl to membrana gali judėti atgal. Kamera leidžia membranai judėti viduje, bet kartu su pakuotėje sukurta kamera turės įtakos mikrofono akustinėms savybėms – dažniniams atsakui bei signalas-triukšmas santykiui.

Priklausomai nuo mikrofono tipo, integrinis grandynas atlieka keletą operacijų. Pirma, jis atlieka pirminį jutiklio signalo stiprinimą ir filtravimą, taip pat gali turėti analogas-kodas keitiklį. Dėl šios priežasties MEMS mikrofono išvesties signalas gali būti analoginis arba skaitmeninis.

Pagal išėjimo signalo pobūdį mikrofonus galima suskirstyti į kelias grupes – analoginius ir skaitmeninius.

### Analoginiai mikrofoni

- Išėjimas yra elektrinis signalas, kurio įtampa proporcinga garso slėgiui
- Šiai grupei priklauso ir ECM, ir MEMS analoginiai mikrofoni, tačiau tarp jų yra didelių skirtumų pagal akustines charakteristikas, dydį ir energijos suvartojimą.
- Analoginio mikrofono sąsajai reikalingas analoginis pirminis apdorojimas:
  - Stiprinimas ir filtravimas
  - Analoginio signalo konvertavimas į skaitmeninį
  - Signalų priėmimo (*acquisition*)

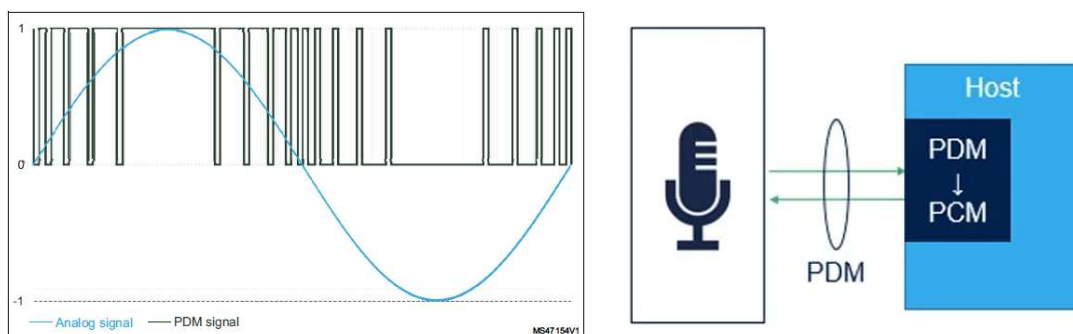


5 pav. Mikrofono analoginio signalo pirminis apdorojimas

Minėtam analoginio signalo apdorojimui įprastai reikia papildomų išorinių komponentų – filtro, analogas-kodas keitiklio ir t.t.

### Skaitmeninis mikrofonas

- Perkelia analoginės sąsajos sudėtingumą ir skaitmeninį konvertavimą į paties komponento vidų.
- Išėjimo signalas – skaitmeninis analoginio signalo atvaizdas (po analogas-kodas konvertavimo).
- Tiesioginė sąsaja su valdančiuoju įrenginiu (mikrovaldikliu).
- Dažniausias formatas – PDM (*angl. pulse-density modulation* - impulsų tankio moduliacija)



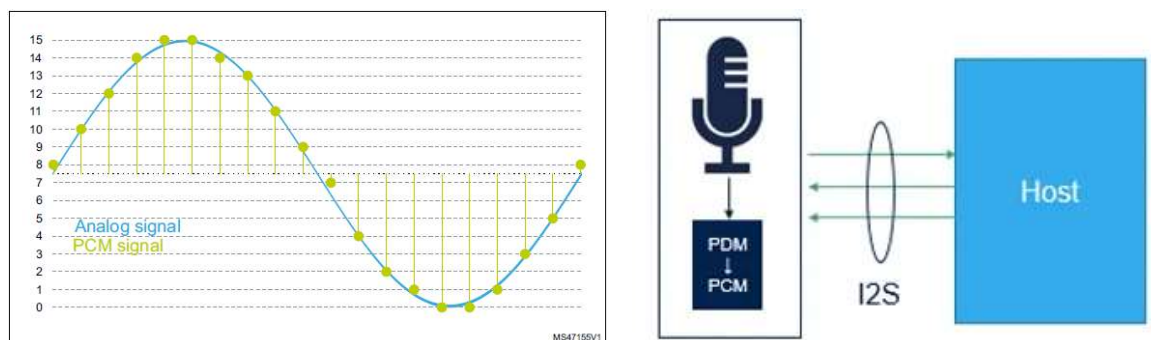
6 pav. PDM – pulse density modulation

PDM yra moduliavimo būdas, naudojamas analoginiam signalui pateikti skaitmeninėje srityje. Tai aukšto dažnio 1 bito skaitmeninių imčių srautas. PDM signalė santykinis impulsų tankis atitinka analoginio signalo amplitudę. Didelis loginių 1-ų klasteris atitinka didelę (teigiamą) amplitudės reikšmę, tuo tarpu didelis loginių 0-ų klasteris atitiktų žemą (neigiamą) amplitudės reikšmę, o besikeičiantys tarpusavyje „1“ ir „0“ – nulinę amplitudės reikšmę.

Toks signalo formatas gaunamas iš sigma-delta 1-o bito analogas-kodas keitiklio ir gali būti lengvai perduodamas per dviejų laidų duomenų perdavimo sąsają – taktinių impulsų (generuojamų valdančiojo įtaiso) ir duomenų.

Konvertavimas iš PDM į PCM gali būti atliekamas programiškai arba specializuotos aparatinės įrangos pagalba.

Kita, tačiau rečiau naudojama galimybė – duomenis iš mikrofono perduoti PCM formatu. Rinkoje yra keletas mikrofonų modelių, kurie patys atlieka duomenų konvertavimą iš PDM formato į PCM. Šiuo atveju duomenys perduodami per I2S sąsają.



7 pav. I2S mikrofonų sąsaja

## Mikrofonai pagal taikymo pobūdį

### Analoginiai MEMS mikrofonai

- Nešiojami prietaisai (klausos aparatai, ausinės ir kt.), mobilieji telefonai
- Mažesnis energijos suvartojimas, mažesnis pilno analoginio apdorojimo vėlinimas, įgalinantis atlikti aktyvųjų triukšmų pašalinimą.

### Skaitmeniniai MEMS mikrofonai

- Asmeniniai kompiuteriai, išmanieji garsiakalbiai, daiktų interneto įrenginiai, automobilinė (laisvų rankų) įranga
- PDM sąsaja sumažina trukdžius esant ilgų kabelių linijoms ar elektromagnetiniams trukdžiams aplinkoje

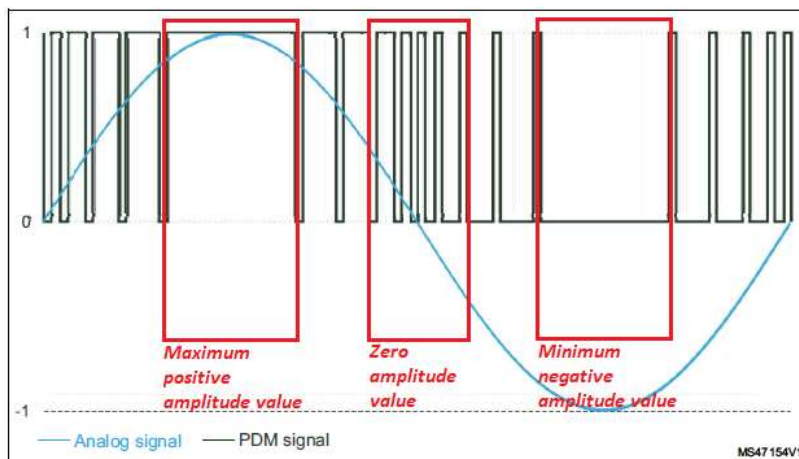
	Analog MEMS	PDM MEMS	I2S	ECM
Power Consumption	Ultra low power (150 uA max)	Low power modes (down to 285 uA)	600uA typ	500uA max
Dimensions	Compact Package	Compact Package	Compact Package	Big Dimensions
Signal management	Analog front-end required	Digital output	Digital output	Analog front-end required
Pinout	3 signals	5 signals	6 signals	2 signals
Acoustic performances	+/- 1 dB sensitivity High AOP	+/- 1 dB sensitivity Very High AOP	+/- 3 dB Sensitivity 120 dB SPL AOP typ	Low sensitivity match Temperature stability

8 pav. Mikrofonų pagrindinių savybių palyginimas

## PDM mikrofonas

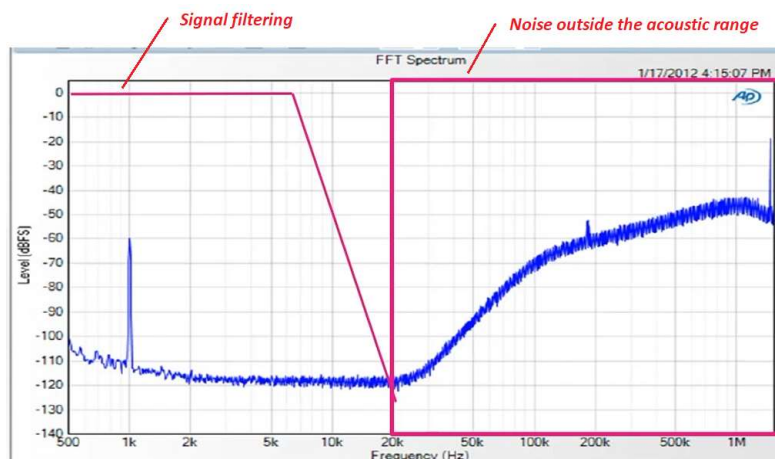
Impulsų tankio moduliacija arba PDM yra moduliavimo forma, naudojama analoginiam signalui atvaizduoti dvejetainiu skaitmeniniu signalu.

- Dvejetainis signalas – aukšto dažnio 1 bito duomenų srautas, sigma-delta moduliatoriaus išėjimas.
- Santykinis impulsų tankis atitinka analoginio signalo amplitudę.



9 pav. PDM signalo reikšmė

PDM signalo diskretizavimo dažnis paprastai svyruoja nuo 520 kHz iki 4 MHz.



10 pav. PDM signalo dažninis atsakas

Įprasto PDM mikrofono dažninis atsakas:

- Delta – sigma keitiklis perkelia triukšmus (kvantavimo paklaidą) į aukštesnius dažnius už girdimumo ribos<sup>1</sup>

Toks signalas turi būti apdorotas:

- Filtravimas – pašalinti aukšto dažnio triukšmai
- Decimavimas – sumažintas diskretizavimo dažnis

Rezultate gaunamas skaitmeninis signalas PCM formatu.

<sup>1</sup> Daugiau apie sigma-delta keitiklio veikimą: <https://hackaday.com/2016/07/07/tearing-into-delta-sigma-adcs-part-1/>

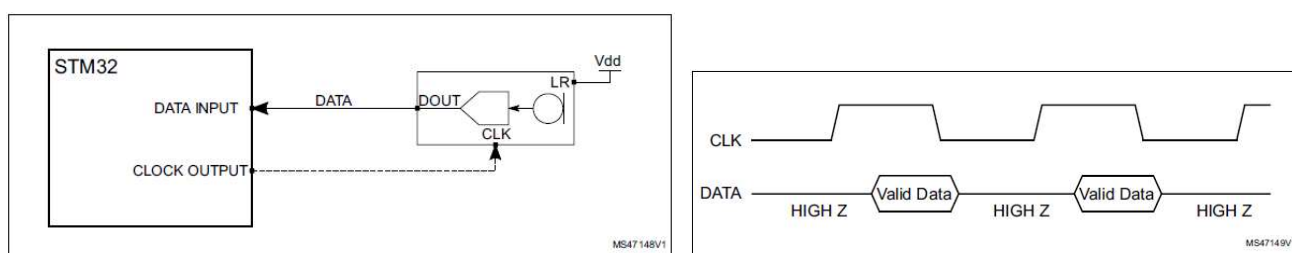
## Skaitmeninio PDM mikrofono sąsaja

Praktiškai PDM mikrofono sąsaja įgyvendinama naudojant tris signalus:

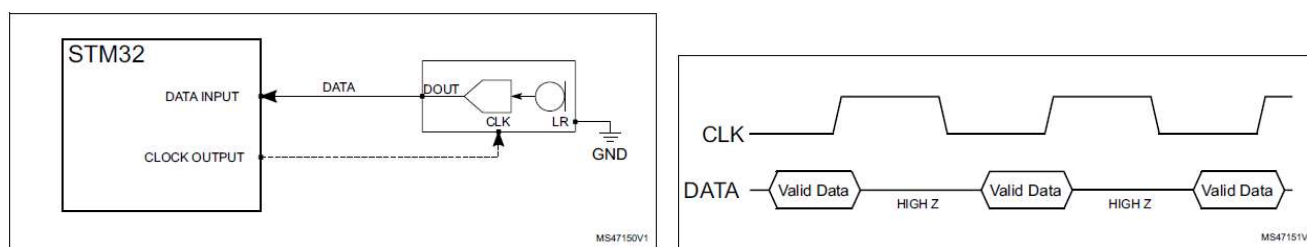
- Taktiniai impulsai (*Clock*) – generuoja valdantysis įrenginys (mikrovaldiklis). Atliekama sinchronizacija ir nustatomas diskretizavimo dažnis.
- Duomenys (*Data*) – duomenų išėjimas iš mikrofono. Sinchronizuotas pagal taktinius impulsus.
- Kairė/dešinė (*Left/Right*) – nustatomas taktinių impulsų frontas, pagal kurį sinchronizuojami mikrofono išėjimo duomenys.

Priklausomai nuo LR išvado įtampos (prijungta prie *GND* ar *Vdd*), mikrofonas išduoda duomenis, sinchronizuotus pagal kylantį arba krentantį taktinių impulsų frontą (žiūr. 11-12 pav.).

Duomenų signalas galioja pusę taktinių impulsų periodo. Kitai periodo daliai išvadas pereina į aukšto impedanso būseną.

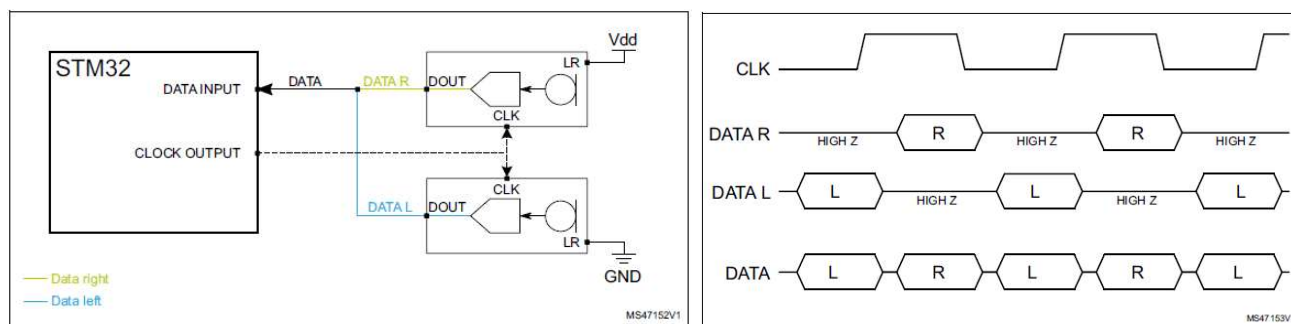


11 pav. Mono pajungimas – duomenys generuojami dešiniajam kanalui



12 pav. Mono pajungimas – duomenys generuojami kairiajam kanalui

Šis LR prijungimo mechanizmas leidžia naudoti vieną duomenų liniją dviejų PDM mikrofonų prijungimui ir stereo signalo formavimui.



13 pav. Stereo pajungimas – vienos duomenų linijos padalinimas

Du skirtingi PDM mikrofonai prijungti prie tos pačios linijos, tačiau skirtingai nustatomas duomenų signalo sinchronizavimas, vieno mikrofono LR išvadą prijungiant prie *Vdd*, kito – prie *GND*.



## Žemos galio darbo režimai

Šiuolaikiniai PDM mikrofonai gali veikti keliais darbo režimais, kad būtų užtikrintas geriausias santykis tarp energijos suvartojimo ir reikiamų akustinių savybių.

- Kai taktinių impulsų nėra arba jų dažnis labai žemas, skaitmeninis mikrofonas perjungimas į mažos galios režimą (arba power-down).
- Kai taktinių impulsų dažnis žemas (įprastai tarp 400 kHz ir 800 kHz), mikrofonas veikia žemos galios režimu. Tai reiškia, kad yra tam tikras jo veikimo pablogėjimas, siekiant kiek įmanoma sumažinti galios suvartojimą. Ši funkcija prieinama ne visuose mikrofonuose.
- Kai taktinių impulsų dažnis aukštas (maždaug nuo 1 MHz iki 4.8 MHz), mikrofonas veikia normaliu režimu.

Taktinių impulsų signalas turi būti kiek įmanoma švarus, su mažu „jitter“iu. Konkretūs dažnių diapazonai priklauso nuo kiekvieno mikrofono, tikslesnė informacija randama duomenų lape.

1 lentelė. Mikrofono taikymo pavyzdžiai ir galimi dažnių diapazonai

Use-cases	Clock frequency provided to the digital microphone
Sound capture	Between 400 and 800 kHz
Speech application	Between 1 and 1.5 MHz
High-quality audio application	Between 2.4 and 4.8 MHz

Reikia atkreipti dėmesį, kad kuomet mikrofonas pereina iš mažos galios režimo aktyvavus taktinių impulsų signalą arba pasikeitus dažnių diapazonui, gali prireikti kelių milisekundžių, kol duomenų signalas pasieks reikiamą kokybę.

2 lentelė. MP23DB01HP mikrofono savybės

Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ. <sup>(1)</sup>	Max.	Unit
Vdd	Supply voltage		1.6	1.8	3.6	V
fclk	Clock frequency range <sup>(2)(3)</sup>	Power-down mode	0		0.15	MHz
		Low-power mode	0.54	0.768	1.1	
		Performance mode	1.5	2.4	3.3	
Idd	Current consumption in low-power mode	Fc = 768 kHz		285		μA
Idd	Current consumption in performance mode	Fc = 2.4 MHz		800		μA
		Fc = 3.072 MHz		880		μA
IddPdn	Current consumption in power-down <sup>(4)</sup>			2	5	μA

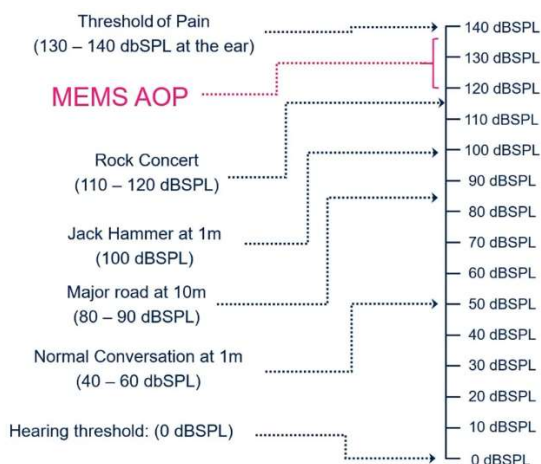
## Akustiniai parametrai

### AOP – acoustic overload point

Akustinis perkrovos taškas (AOP – *angl. Acoustic overload point*) – didžiausias garsas, kurį gali priimti mikrofonas be pernelyg didelių iškraipymų.

AOP matuojamas dBSPL. Tai fizinio slėgio, kurį sukuria akustinė banga realiame pasaulyje, matas.

AOP nurodo garso slėgio lygį (SPL – *angl. Sound pressure level*), kuriam esant mikrofonas pasiekia 10 procentų bendrą harmoninį iškraipymą (THD – *angl. Total harmonic distortion*). Anksčiau telefonų gamintojai naudojo 120 dB SPL kaip pagrindinį AOP lygį daugeliui mikrofonų. AOP reikalavimas neseniai pakilo iki 130 dB SPL ir daugiau.



14 pav. Garso slėgio lygių palyginimas

### EIN – equivalent input noise

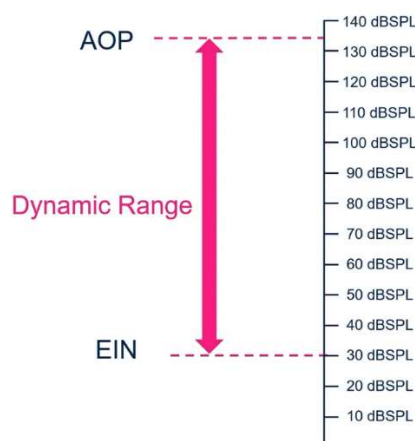
Priešingoje garso skalės dalyje – liekamasis triukšmas (*angl. residual noise*).

Mikrofonas – tai garso bangų į elektrinį signalą keitiklis. Tai reiškia, kad bet koks išėjimo signalas atitinka specifinį garsą įėjime. Ekvivalentinis įėjimo triukšmas (EIN – *angl. equivalent input noise*) yra akustinis lygis, atitinkantis liekamąjį triukšmą išėjime.

Liekamasis triukšmas – mikrofono elektrinis išėjimo signalas esant tylai:

- Negeruojamas išorinių akustinių bangų.
- Sukurtas viduje
- Atitinka tylą fiziniame pasaulyje
- Apibrėžia tyliausią garsą, kurį gali priimti mikrofonas.

Tipinis MEMS mikrofonų ekvivalentinis įėjimo triukšmas - ~30 dB SPL.



15 pav. Mikrofono dinaminis diapazonas

Dinaminis diapazonas nurodo visą mikrofono jautrumo (priėmimo) diapazoną:

- Tai skirtumas tarp AOP ir EIN



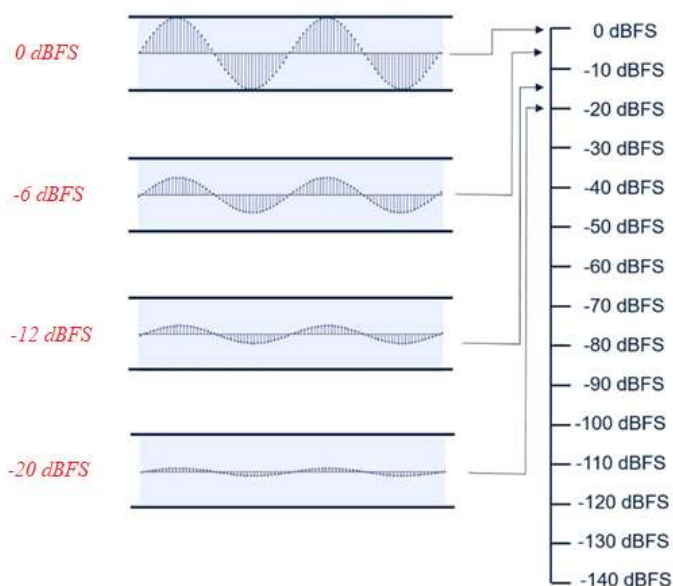
## Decibels relative to Full Scale - dBFS

Decibelai atitinkantys pilną skalę (dBFS – angl. *Decibels relative to full scale*) – tai amplitudės lygio matavimo vienetas, naudojamas skaitmeninėse sistemose, pavyzdžiui, PCM, kurios turi nustatytą didžiausią signalo maksimalios vertės (*maximum peak*) lygį. Tai maksimalus skaitmeninio signalo lygis, kuris gali būti pateiktas be saturacijos.

0 dBFS lygis priskiriamas maksimaliam galimam skaitmeniniui lygiui.

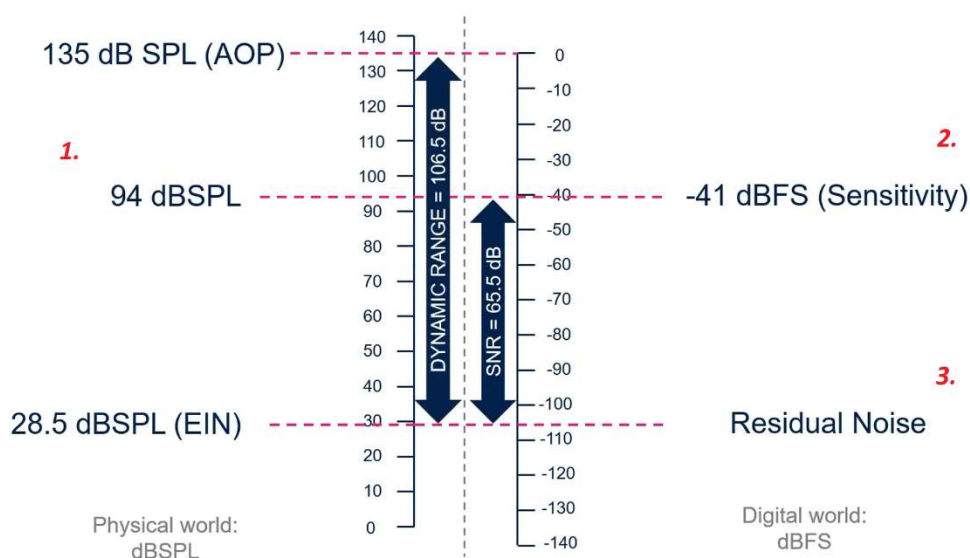
Pagal šį matavimą signalo amplitudė gali būti pateikta kaip santykis tarp išmatuotos vertės ir pilnos skalės. Kiek kartų signalas yra tylesnis lyginant su maksimalia galima verte?

Pavyzdžiui, signalo, kuris pasiekia 50% nuo maksimalios vertės, lygis yra -6 dBFS.



16 pav. Signalų lygis skaitmeniniame pasaulyje: dBFS

17 pav. pateiktas apibendrintas tarpusavio ryšys tarp akustinio ir elektrinio domainų bei susijusių parametrų.



17 pav. Akustinio ir elektrinio domainų sąsaja – skaitmeninio mikrofono pavyzdys

Sąsaja tarp „skaitmeninio“ ir „fizinio“ pasaulio bus individuali kiekvienam atskiram mikrofonui ir priklausys daugiausia nuo jo AOP.

Kaip išmatuoti parodyti parametrai:

1. Matavimams naudojamas standartinis atraminis 1 kHz garsas, kurio garso slėgio lygis mikrofone yra 94 dBSPL.
2. Pirmiausia išmatuojamas jautrumas. Tai skaitmeninis signalas mikrofono išėjime esant standartiniam atraminiam garsui.
3. Tada išmatuojami vidiniai triukšmai. Matavimas atliekamas izoliuotos beaidės kameros viduje. dBFS reikšmė atitinka lygiavertį įvesties triukšmą dBSPL.

Signalų-triukšmo santykis (SNR) nurodo santykį tarp duoto atraminio signalo ir liekamojo triukšmo mikrofono išėjime.

Dinaminis diapazonas iš esmės nurodo mikrofono priėmimo diapazoną ir apskaičiuojamas kaip skirtumas tarp AOP (akustinio perkrovos taško) ir EIN (ekvivalentinio įėjimo triukšmo).

## PDM signalo konvertavimas į PCM

PDM konvertavimas į PCM yra veiksmų ir metodų, susijusių su PDM mikrofono išvesties 1 bito duomenų srauto konvertavimu į standartinį skaitmeninį signalą PCM formatu, rinkinys. Šis procesas apima keletą žingsnių:

- Žemų dažnių (*Low-Pass*) filtras
- Decimavimas
- Aukštų dažnių (*Hi-Pass*) filtras signalo nuolatinės dedamosios pašalinimui
- Signalų sustiprinimas

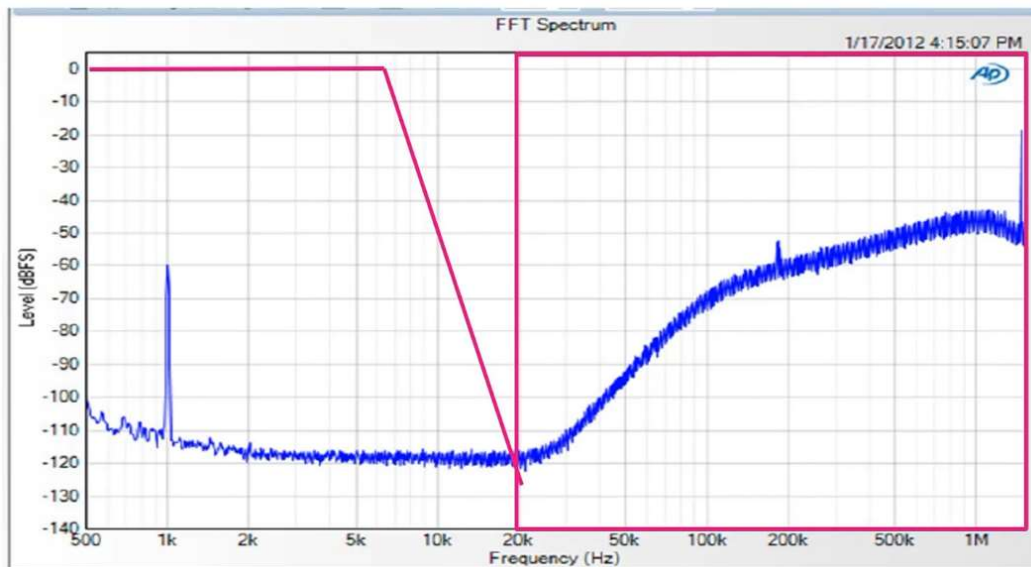


18 pav. PDM signalo konvertavimo į PCM etapai

### Žemų dažnių filtras

Žemų dažnių filtras praleidžia žemus dažnius ir slopina aukštesnius dažnius už atkirtos dažnį  $f_c$ . PDM signalo konvertavimo į PCM proceso metu žemų dažnių filtras:

- Filtruoja aukšto dažnio triukšmus
- Leidžia išvengti dažnių persidengimo efekto (*anti-aliasing*) ir atitinkamų trukdžių PCM formate.

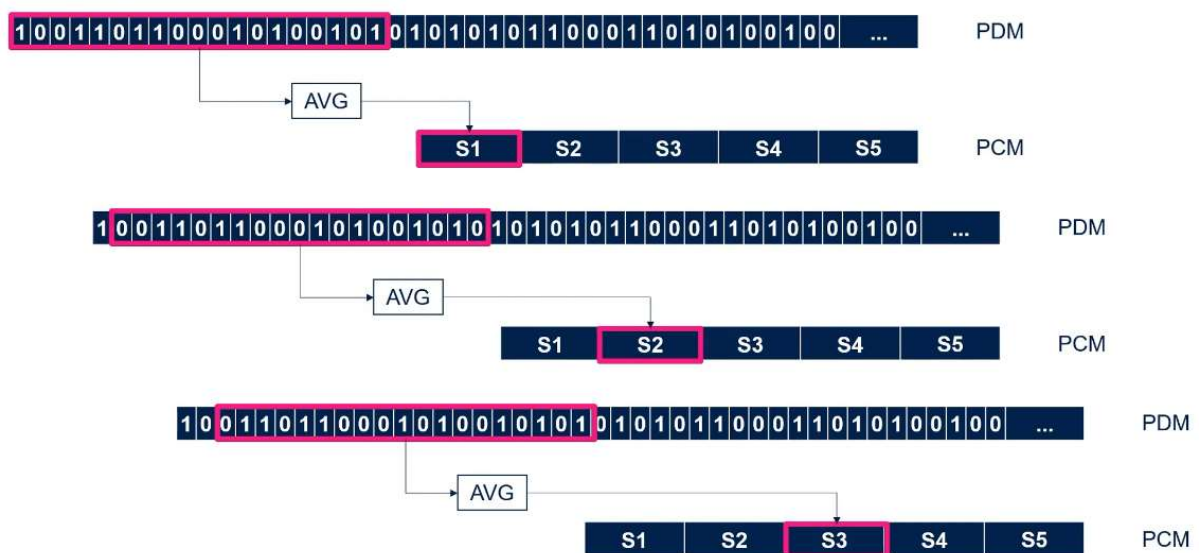


19 pav. PDM signalo dažninis atsakas

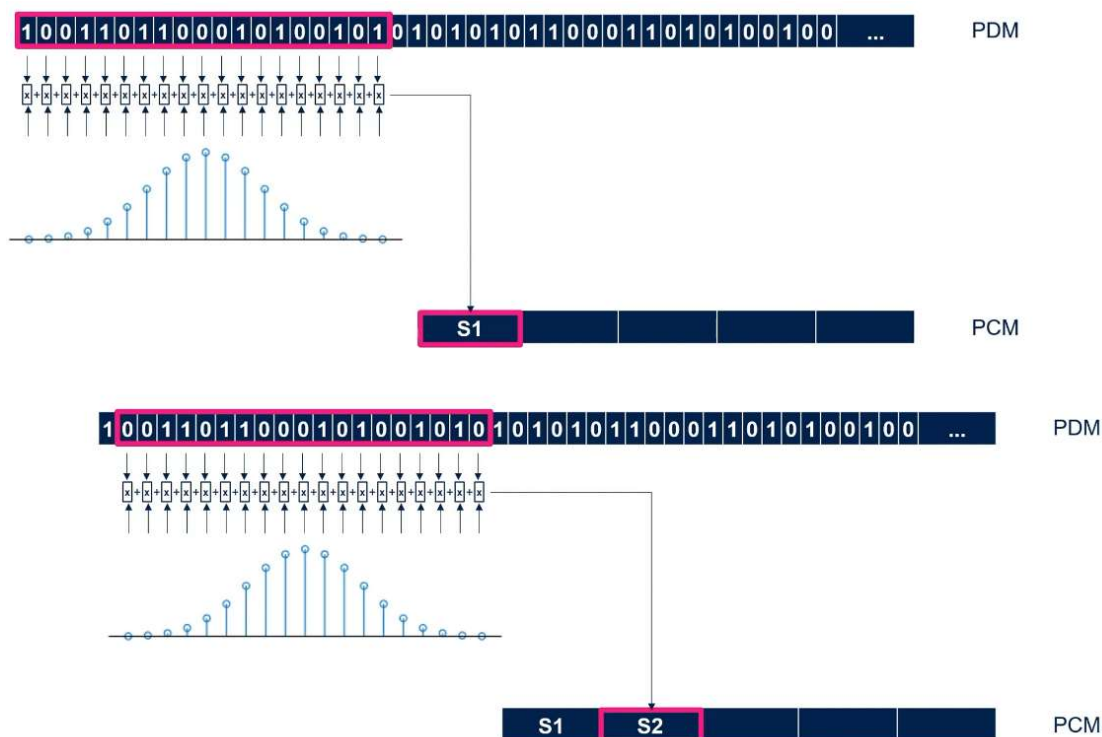
Kadangi apdorojamas skaitmeninis signalas, filtravimui atitinkamai naudojamas skaitmeninis FIR filtras.

FIR filtras veikia panašiai kaip slenkančios vidurkio filtras. Kiekviena išėjimo signalo imtis apskaičiuojama kaip vidurkis iš  $n$  paskutinių įėjimo verčių.

Pagrindinis skirtumas tarp FIR ir slenkančio vidurkio filtrų yra tai, kad slenkančio vidurkio filtro atveju visų įėjimo imčių „svoriai“ yra vienodi, o FIR filtro atveju naudojami koeficientai, įtakoiantys įėjimo imčių „svorius“ atitinkamai išėjimo signalo vertei.



20 pav. PDM signalo filtravimas naudojant slenkančio vidurkio filtrą

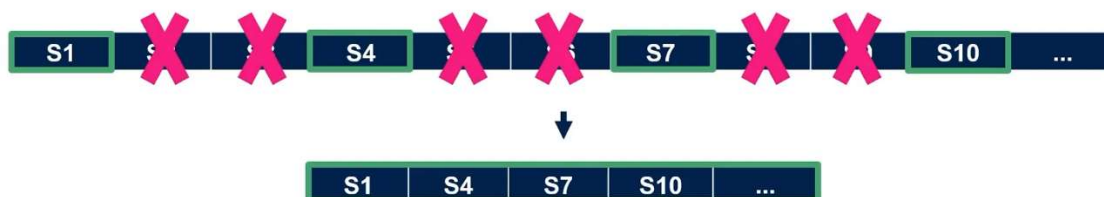


21 pav. PDM signalo filtravimas naudojant FIR filtrą

## Decimavimas

Antroji konvertavimo proceso operacija – decimavimas. Decimavimo metu atmetama dalis signalo imčių siekiant sumažinti diskretizavimo dažnį.

Decimavimo koeficientas  $M$  nurodo, kad iš originalaus signalo reikia palikti kiekvieną  $M$ -ąją elementą, kitus atmetant.


 22 pav. Decimavimo pavyzdys, esant koeficientui  $M = 3$ 

Po decimavimo pasikeičia diskretizavimo dažnis:

$$\text{new sampling frequency} = \text{original sampling frequency} / M$$

Filtravimo ir decimavimo operacijos gali būti tarpusavyje sujungtos:

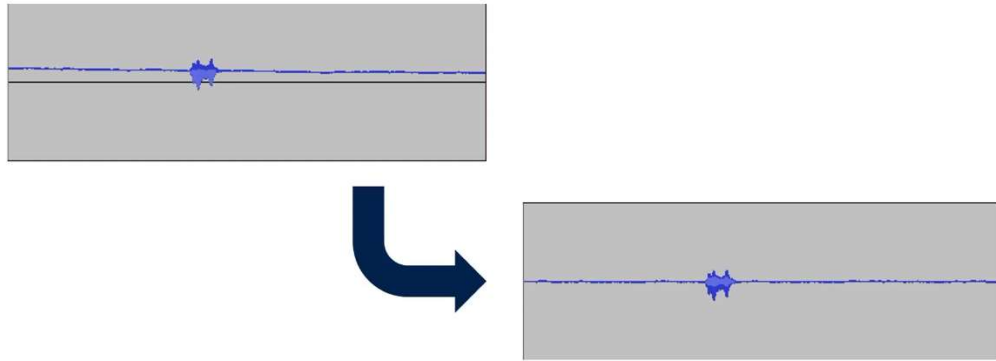
- Nebereikia skaičiuoti visų signalo verčių – kai kurios gali būti atmetos
- Leidžia stipriai optimizuoti procesą ir sumažina skaičiuojamosios galios poreikį, kadangi filtruojant nereikia skaičiuoti išėjimo signalo verčių, kurios vėliau bus atmetos.
- FIR filtro naudojimas įgalina apjungti tarpusavyje šiuos žingsnius, kadangi išėjimo signalo vertės priklauso tik nuo įėjimo verčių; tokiu atveju atskirų išėjimo verčių atmetimas neturi įtakos kitoms.

### Aukšto dažnio filtras

Aukštų dažnių filtras praleidžia aukštus dažnius ir slopina žemesnius dažnius už atkirtos dažnį  $f_c$ .

PDM signalo konvertavimo į PCM proceso metu aukštų dažnių filtras naudojamas pašalinti nuolatinę dedamąją, kuri gali būti išėjimo signalė. Esant nuolatinėi dedamajai, išėjimo signalo amplitudės vidutinė vertė nėra lygi nuliui (kaip turėtų būti), o pasislinkusi į teigiamą ar neigiamą pusę.

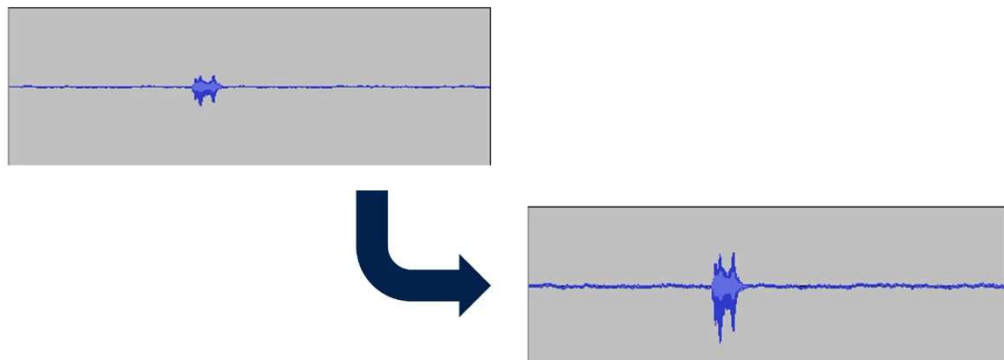
Šiam efektui pašalinti užtenka paprasto vieno poliaus rekursinio filtro. Įprastai tokio filtro atkirtos dažnis yra žemiau 20 Hz, kad neįtakoti girdimo signalo.



23 pav. Aukštų dažnių filtras nuolatinėi signalo dedamajai pašalinti

### Signalų stiprinimas (*Gain*)

Šio žingsnio metu atliekamas audio signalo lygio suderinimas, padidinant (sumažinant) jo amplitudę. Tai paprasčiausiai gali būti atliekama kiekvienos signalo imties vertę padauginant iš tam tikros konstantos.



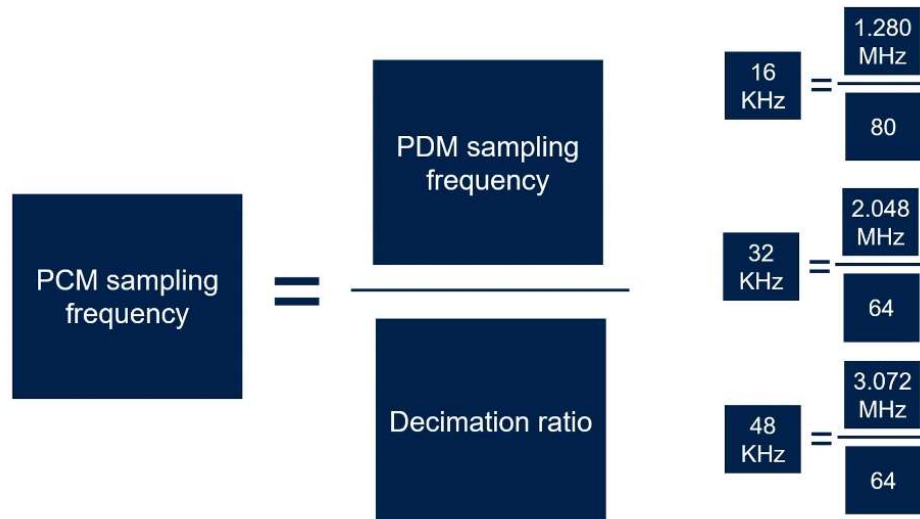
24 pav. Audio signal stiprinimas

### Diskretizavimo dažnis ir decimavimo koeficientas

Kaip tinkamai nustatyti parametrus, siekiant gauti norimo dažnio PCM signalo srautą? Tai įtakoja trys parametrai:

- PDM signalo diskretizavimo dažnis
  - Yra lygis mikrofono taktinių impulsų dažniui
  - Apribotas techninėmis mikrofono galimybėmis

- PCM signalo diskretizavimo dažnis – siekiamas gauti PCM išėjimo srauto dažnis
  - Tipinis dažnis garo įrašymui – 16 kHz
  - 32 ar 48 kHz, jei reikalingas didesnis spektras.
- Decimavimo koeficientas – santykis tarp PDM ir PCM diskretizavimo dažnių
  - Ne visos reikšmės yra galimos – priklausomai kaip atliekamas decimavimo procesas, t.y. programinių bibliotekų pagalba ar aparatinės periferinės įrangos.
  - Tipinės STM32 programinių bibliotekų naudojamos vertės: 64, 80, 128



25 pav. PCM diskretizavimo dažnio apskaičiavimo pavyzdys

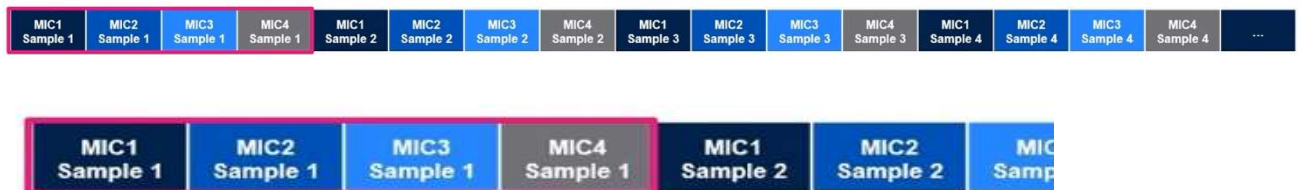
## STM32 PDM konvertavimo į PCM programinės bibliotekos

STM32 PDM konvertavimo į PCM programinės bibliotekos atlieka visus konvertavimui reikalingus žingsnius, t.y. žemo dažnio filtrą, decimavimą, aukšto dažnio filtrą bei signalo lygio nustatymą.

- Bibliotekos veikia STM32 Cortex-M0, M0+, M3, M4 ir M7 mikrovaldikliuose.
- Nėra reikalingos tiems mikrovaldikliams, kuriuose konvertavimas atliekamas aparatiškai.

### Audio signalo buferis

Standartinis PCM buferis sudarytas iš vieno paskui kitą sudėtų kanalų imčių. Keturių kanalų pavyzdyje matome, kad pirmos keturios reikšmės atitinka pirmas kiekvieno kanalo imtis,

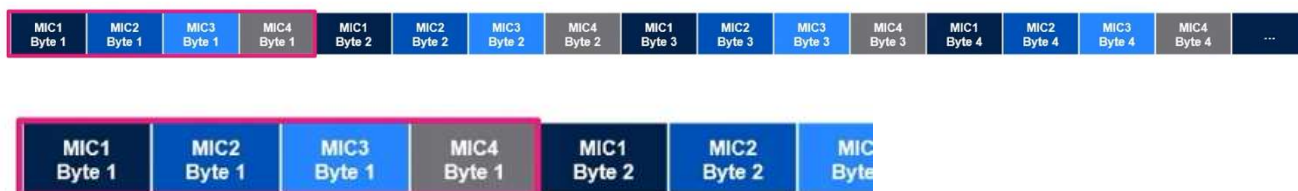


26 pav. 4 kanalų standartinio PCM buferio pavyzdys



PDM formatas nėra apibrėžtas standartu. Naudojant STM32 biblioteką, PDM duomenys turi būti išdėstyti baitais, o baitai atitinkamai sudėti paeiliui pagal kanalus.

Pateiktame keturių kanalų pavyzdyje matome, kad pirmieji keturi baitai atitinka pirmus aštuonis PDM signalo bitus iš keturių PDM mikrofonų, antrieji keturi baitai – tolimesnius aštuonis PDM bitus iš kiekvieno mikrofono ir t.t.

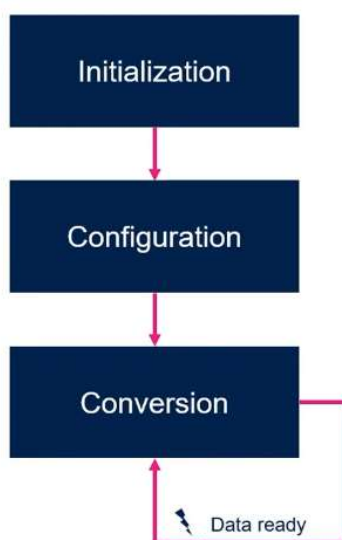


27 pav. 4 kanalų PDM buferio pavyzdys

## Bibliotekų vykdymo eiga

Bibliotekų vykdymo eiga gali būti suskirstyta į tris fazes:

- Inicializavimas
- Konfigūravimas
- Konvertavimas



28 pav. Apibendrinta bibliotekų vykdymo eiga

Inicializavimas – nustatomi visi esminiai parametrai, kurie bus fiksuojami visam bibliotekos gyvavimo ciklui. Šie parametrai nustatomi pradinėje fazėje ir negali būti keičiami tol, kol neatliekamas naujas inicializavimas.

Konfigūravimas – visų parametru, kuriuos vėliau bus galima keisti vykdymo metu, nustatymas, pavyzdžiui, signalo stiprinimas. Jis nustatomas pradžioje su pradine verte, tačiau jį galima keisti programos vykdymo metu, jei vartotojas nori pakeisti garsumo nustatymą.

Konvertavimas yra tikrasis filtravimo ir decimavimo funkcijos vykdymas. Paprastai ji periodiškai iškviečiama duomenų surinkimo (priėmimo) proceso metu. Kai tik turime pakankamai duomenų apdorojimui, iškviečiame apdorojimo funkciją.

## Programinės sąsajos (API) aprašymas

Bibliotekos inicializavimo parametrų saugojimui skirta duomenų struktūra:

```
typedef struct{
    uint16_t bit_order;
    uint16_t endianness;
    uint32_t high_pass_tap;
    uint16_t in_ptr_channels;
    uint16_t out_ptr_channels;
    uint32_t pInternalMemory[PDM2PCM_INTERNAL_MEMORY_SIZE];
}PDM_Filter_Handler_t;
```

29 pav. PDM Filter Handler

Kiekvienam mikrofonui reikalingas atskiras handleris. Parametrai:

- *bit\_order* and *endianness* – aprašo bitų ir baitų tvarką gautuose PDM duomenyse. Priklausomai nuo periferinio įrenginio, naudojamo gavimui, PDM duomenys PDM buferyje gali būti išdėstyti skirtingai.
- *high\_pass\_tap* parametras skirtas nustatyti aukšto dažnio filtro atkirtos dažnį. Daugiau informacijos apie šios reikšmės formatą galima rasti informaciniame vadove (reference manual).
- *in\_ptr\_channels* and *out\_ptr\_channels* nurodo kanalų skaičių, esančių atitinkamai PDM įėjimo buferyje ir PCM išėjimo buferyje

Konfigūravimo parametrai (kurie gali būti keičiami darbo metu) saugomi duomenų struktūroje:

```
typedef struct{
    uint16_t decimation_factor;
    uint16_t output_samples_number;
    int16_t mic_gain;
}PDM_Filter_Config_t;
```

30 pav. Duomenų struktūra konfigūravimo parametrų saugojimui

Parametrai:

- *decimator\_factor* – decimavimo koeficientas, taikomas PDM srautui
- *output\_samples\_number* – PCM imčių kiekis, kuris turi būti generuojamas kiekvieno apdorojimo funkcijos iškvietimo metu. PDM buferyje turi būti pateiktas teisingas įvesties imčių skaičius, kad būtų išvengta buferio perpildymo nuskaitant įvesties duomenis.
- *mic\_gain* – mikrofono signalo stiprinimas decibelais.

Esamų parametrų nuskaitymui ar naujų nustatymui skirtos funkcijos:

```
uint32_t PDM_Filter_setConfig(PDM_Filter_Handler_t *pHandler, PDM_Filter_Config_t *pConfig);
uint32_t PDM_Filter_getConfig(PDM_Filter_Handler_t *pHandler, PDM_Filter_Config_t *pConfig);
```

31 pav. Parametrų nustatymui arba nuskaitymui skirtos funkcijos

Duomenų konvertavimui skirta funkcija:

```
uint32_t PDM_Filter(void *pDataIn, void *pDataOut, PDM_Filter_Handler_t *pHandler);
```

32 pav. Konvertavimo funkcija

Konvertavimo funkcijos parametrai:

- *\*pDataIn* – rodyklė į pirmąjį PDM įvesties baitą
- *\*pDataOut* – rodyklė į pirmąją imtį, kuri turi būti įrašyta į išvesties buferį
- *\*pHandler* – atitinkamo mikrofono handleris

Pastabos!

- Kiekvienam mikrofono konvertavimui reikalingas handleris
- Kiekvienam mikrofono konvertavimui turi būti kviečiama apdorojimo funkcija

#### 4 mikrofonų signalo konvertavimo pavyzdys – Inicializavimas ir konfigūravimas

```
static void PDMDecoder_Init(uint32_t AudioFreq, uint32_t Chn1NbrIn, uint32_t Chn1NbrOut)
{
    uint32_t index = 0;

    /* Enable CRC peripheral to unlock the PDM library */
    __HAL_RCC_CRC_CLK_ENABLE();

    for(index = 0; index < 4; index++)
    {
        /* Init PDM filters */
        PDM_FilterHandler[index].bit_order = PDM_FILTER_BIT_ORDER_LSB;
        PDM_FilterHandler[index].endianness = PDM_FILTER_ENDIANNESSE_LE;
        PDM_FilterHandler[index].high_pass_tap = 2122358088;
        PDM_FilterHandler[index].out_ptr_channels = 4;
        PDM_FilterHandler[index].in_ptr_channels = 4;
        PDM_Filter_Init((PDM_Filter_Handler_t *)&PDM_FilterHandler[index]);

        /* PDM lib config phase */
        PDM_FilterConfig[index].output_samples_number = AudioFreq/1000;
        PDM_FilterConfig[index].mic_gain = 24;
        PDM_FilterConfig[index].decimation_factor = PDM_FILTER_DEC_FACTOR_64;
        PDM_Filter_setConfig((PDM_Filter_Handler_t *)&PDM_FilterHandler[index], &PDM_FilterConfig[index]);
    }
}
```

33 pav. Inicializavimo ir konfigūravimo pavyzdys

Pirmiausia, norint „atrankinti“ PDM biblioteką reikia aktyvuoti CRC periferinį įtaisą.

Toliau atliekamas inicializavimas ir konfigūravimas:

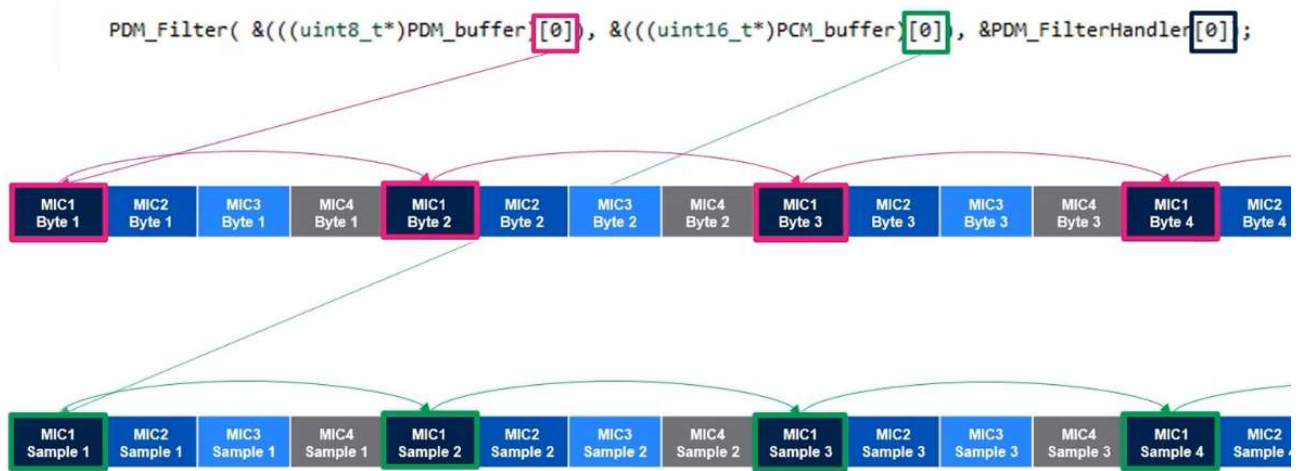
- Nurodomi kiekvienam mikrofonui reikiami parametrai ir iškviečiama inicializavimui skirta *PDM\_Filter\_Init()* funkcija.
- Atitinkamai nurodomi kiekvienam mikrofonui reikiami konfigūravimo parametrai ir iškviečiama *PDM\_Filter\_setConfig()* funkcija

#### 4 mikrofonų signalo konvertavimo pavyzdys – konvertavimo vykdymas

Kuomet prieinami įvesties duomenys (PDM signalas), kviečiama konvertavimo funkcija. Funkcija yra kviečiama kiekvienam mikrofonui atskirai, nurodant reikiamus parametrus.

```
for(index = 0; index < 4; index++)
{
    /* PDM to PCM filter */
    PDM_Filter( &(((uint8_t*)PDM_buffer)[index]), &(((uint16_t*)PCM_buffer)[index]), &PDM_FilterHandler[index]);
}
```

34 pav. Konvertavimo pavyzdys



35 pav. Duomenų skaitymas ir rašymas į buferį

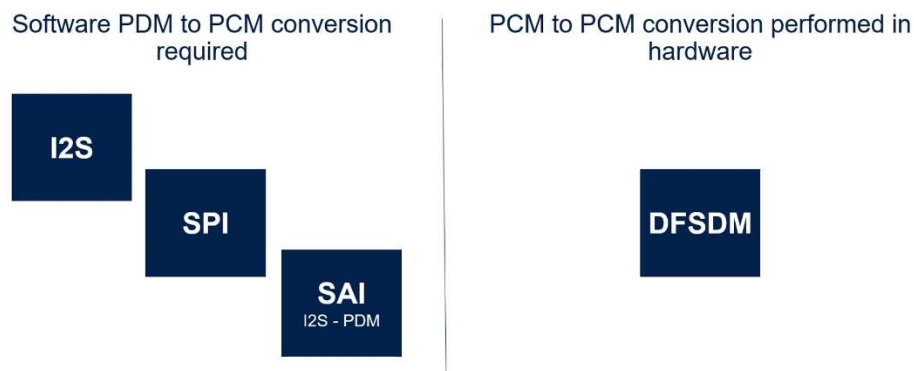
Pirmojo funkcijos kvietimo metu rodyklė nurodoma į pirmą PDM buferio baitą, pirmąjį PCM buferio „half-word“, bei pirmąjį handlerį.

Kadangi konfigūravimo metu nurodytas įvesties ir išvesties kanalų skaičius 4, todėl biblioteka nuskaitys pirmą PDM baitą iš keturių ir atitinkamai įrašys pirmą PCM „half-word“ iš keturių (kanalų).

Sekančio funkcijos kvietimo metu duomenų nuskaitymas ir rašymas vyks tokia pačia tvarka, tik šiuo atveju rodyklė bus nurodyta į sekantį PDM baitą bei sekantį PCM „half-word“.

## STM32 periferinės sąsajos, skirtos MEMS skaitmeniniams mikrofonams

Skaitmeninių MEMS mikrofonų prijungimui gali būti naudojama keletas skirtingų STM32 sąsajų.



36 pav. Sąsajos mikrofono signalo priėmimui

Dalis periferinių įrenginių (sąsajų) gali priimti mikrofono signalą, tačiau konvertavimas iš PDM į PCM atliekamas programiškai. Kita dalis konvertavimą atlieka aparatiškai.

- I2S, SPI ir SAI (*serial audio interface*) priklauso pirmajai grupei. Gali priimti PDM duomenis, bet konvertavimas atliekamas programinių bibliotekų pagalba.
- SAI visuomet gali būti naudojama kaip I2S sąsaja, tačiau kai kuriuose MV ji taip pat gali būti naudojama kaip specifinė daugiakanalė PDM sąsaja.
- DFSDM priima duomenis ir konvertuoja į PCM. Vartotojas šiuo atveju nemato PDM duomenų, kadangi sąsaja tiesiogiai išduoda PCM duomenis.

## Informacijos šaltiniai

AN5027: Interfacing PDM digital microphones using STM32 MCUs and MPUs

UM2372: STM32Cube PDM2PCM software library for the STM32F4/F7/H7 Series

AN4426: Tutorial for MEMS microphones

STM32 Microphone Audio Acquisition playlist:

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLnMKNibPkDnFiiUunr0CHbfSvIkBTnsBs>