

Elektroakustik

Laboration B1, mikrofoner

2008-09-18 14:25:00

Svante Granqvist 2000-2008

OBS! Du måste ha gjort
förberedelseuppgifterna
för att få labba!

Namn: _____

Laborationen/förberedelseuppgifterna godkända

Datum: _____

Sign: _____

Vad handlar labben om?

Under laborationen kommer du att få utsätta några olika mikrofontyper för några olika typer av vågor (t.ex. plan våg). Något som labben bör förmedla är att samma mikrofon kan ha olika tonkurva under olika förutsättningar, samt en del allmänt om olika typer av mikrofoner och ljudfält.

Att mäta ljudstyrka

Ljudfältet i rummet kan delas upp i två komponenter, partikelhastighets- resp tryckfält. Hastighetsfältet är en vektor, dvs har både storlek och riktning medan tryckfältet är skalärt. Olika mikrofontyper kan mäta huvudsakligen tryckfältet eller hastighetsfältet, eller en kombination av de båda. Ett exempel på en tryckkänslig "mikrofon" är örat, som ju består av ett membran med en akustiskt tätad baksida, och membranets rörelse bestäms huvudsakligen av ljudtrycket. Ibland är vi intresserade av ljudintensiteten, J , som är produkten av ljudtryck och partikelhastighet. Vi kan, om vi är noga, bygga en mikrofon bestående av en tryckmikrofon och en hastighetsmikrofon och multiplicera signalerna från dessa elektriskt. Vanligare är dock att använda endast en mikrofon låta signalen från denna representera ljudstyrkan. Om vi då med denna enda mikrofon avser mäta något som är proportionellt mot ljudintensitet bör vi fundera över vilka konsekvenser detta får i olika typer av ljudfält.

Sfärisk våg

Om vi avser mäta intensiteten i en sfärisk våg med hjälp av en enda tryck- eller hastighetskänslig mikrofon bör vi ta ekvationerna för ljudfältet från en punktkälla i begrundande.

$$p = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{\rho_0 c}{r} \cdot \frac{j\omega}{c} \quad (1)$$

$$\vec{v} = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} + \frac{j\omega}{c} \right) \cdot \vec{e}_r \quad (2)$$

Vilket ger:

$$\bar{J} = \text{Re}[p \cdot \vec{v}] = -\frac{Q^2}{16\pi^2} \cdot \frac{\rho_0 \omega^2}{cr^2} \cdot \vec{e}_r \quad (3)$$

Efter viss omskrivning kan vi se att intensitetens belopp kan mätas genom att mäta endast ljudtrycket:

$$|\bar{J}| = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (4)$$

Vi kan alltså mäta intensitetens belopp genom att mäta ljudtrycket, men eftersom tryckfältet är skalärt (saknar riktning) är det omöjligt att avgöra intensitetens riktning. Det betyder i sin tur att det är omöjligt att göra en riktad mikrofon som baseras endast på mätning av ljudtrycket i en punkt. Vill vi göra en riktad mikrofon måste vi mäta hastighetsvektorn, antingen direkt eller indirekt via differentiell tryckmätning och vi kan även ur hastighetsvektorn beräkna intensiteten:

$$\bar{J} = |\vec{v}|^2 \cdot \rho_0 c \cdot \vec{e}_r \quad (\text{fjärrfält}) \quad (5)$$

$$\bar{J} = |\vec{v}|^2 \cdot \frac{\rho_0 \omega^2 r^2}{c} \cdot \vec{e}_r \quad (\text{närfält}) \quad (6)$$

Fjärrfältet är okomplicerat, sambandet mellan intensitet och hastighet är lika enkelt som mellan intensitet och tryck. I närfältet får vi dock ett besvärande frekvensberoende på -6dB/oktav, dessutom måste man känna till avståndet till källan för att kunna beräkna intensiteten.

Observera att gränsen mellan när- och fjärrfält sätts av ekv 2, när termerna inom parentes blir beloppsmässigt lika stora. Detta avstånd bestäms enbart av frekvensen (och ljudhastigheten) och har

4 - Elektroakustik laboration B1, mikrofoner

ingenting med källans eller mikrofonens storlek att göra, de antas ju vara små. Omvänt betyder detta att vi för ett visst givet mikrofonavstånd kommer att få en brytfrekvens under vilken man befinner sig i närfältet. Denna brytfrekvens härleds enkelt ur ekv 2:

$$\omega = \frac{c}{r} \quad (7)$$

Under denna frekvens lutar frekvenssvaret med -6dB/okt, vilket är detsamma som en basförstärkning. Eftersom denna frekvens är beroende av avståndet till källan, så kan inte bashöjningen kompenseras med ett fast högpasfilter, såvida man inte antar ett visst fast mikrofonavstånd. Om man inte vill att brytfrekvensen ska hamna i det hörbara området 20 till 20 000 Hz, så får mikrofonen inte befinna sig mellan avstånden 2,7 mm och 2,7 m.

På grund av den avståndsberoende bashöjningen i hastighetsfältet använder man huvudsakligen tryckkänsliga (och därmed rundtagande) mikrofoner för mätändamål. I andra sammanhang, när tonkurvan inte är så viktig, eller om man befinner sig långt från källan används ofta riktade mikrofoner. Fördelen med sådana är en minskad benägenhet att ta upp störljud och i PA-sammanhang även en minskad risk för rundgång.

Det faktum att tonkurvan kan variera med mikrofonavståndet är något som sällan framgår i tillverkarnas datablad, den som visas gäller inte sällan det avstånd som ger rakast tonkurva.

Sammanfattningsvis har alltså endast rundtagande, tryckkänsliga mikrofoner förutsättningar att ha rak tonkurva för alla mikrofonavstånd vid sfärisk våg. Riktade mikrofoner har alltid olika tonkurva för olika mikrofonavstånd.

Plan våg

En plan våg kan betraktas som en sfärisk våg på stort avstånd från källan. Därmed har vi redan rätt ut vad som händer i förra avsnittet och sammanfattningsvis går det bra att uppskatta intensiteten hos en plan våg antingen via ljudtryck eller partikelhastighet. I ekv 4 och 5 framgår hur omräkningen ska gå till. Eftersom vi befinner oss i fjärrfältet slipper vi bashöjningen från hastighetsmikrofonen och det blir alltså inga sådana problem med att använda riktade mikrofoner.

Stående våg

Intensiteten i en stående våg är per definition 0, eftersom lika stor energi transporteras i den infallande som i den reflekterade vågen, men i motsatt riktning. Trots detta är både tryck och hastighet skilda från 0. Det gör att intensiteten i en stående våg inte kan mätas med endast en tryck- eller hastighetskänslig mikrofon, utan båda måste mätas och multipliceras med varandra för att erhålla den verkliga intensiteten. Nu är det sällan intressant att mäta intensiteten hos en stående våg, just eftersom den per definition är noll, men i verkligheten har vi oftast kombinationer av olika vågtyper. Om vi tex har en blandning av plan och stående våg, och vi vill mäta ljudintensitet så måste vi sortera bort den stående vågen, och detta kan man då göra genom att mäta den verkliga intensiteten via både tryck och hastighet som i ekv 3. Är vi däremot intresserade av hur örat uppfattar ljudfältet i en stående våg bör vi mäta enbart ljudtrycket eftersom örat ju huvudsakligen är tryckkänsligt. I sådana fall kan man i fallet med stående våg förvänta sig stora variationer i ljudtrycksnivå beroende på var i rummet mikrofonen placeras.

Omvandlingsprinciper

Beskrivningarna ovan av vågtyper är akustisk-fysikaliska fakta om ljudfält som inte har mycket att göra med vilken omvandlingsprincip man använder i mikrofonen. Det enda som berörts är om mikrofonen huvudsakligen mäter hastighets- eller tryckfält. Utöver detta finns en mängd mekaniska, elektriska och akustiska fenomen som påverkar en mikrofonens tonkurva som är mer relaterade till konstruktionen av mikrofonen, som tex. membranets inspänning, resonansfrekvens, huruvida det finns en kavitet bakom membranet etc. Ytterligare faktorer som påverkar tonkurvan är omvandlingsprincipen, såsom kondensator- eller elektrodynamisk, där skillnaden mellan olika principer ofta motsvarar en tidsderivering eller -integrering. Vidare kan även den elektriska anslutningen påverka tonkurvan. Alla dessa faktorer tillför dock egenskaper i tonkurvan som är

oberoende av vågtyp och alltså åtminstone i princip kan korrigeras elektroniskt eftersom de är oberoende av mikrofonplacering.

Membranet i en mikrofon kan modelleras med en massa (membranet), en fjädring (i en membranupphängning längs kanten, eller i membranet självt) och en dämpning. Konstruktören av mikrofonen måste förlägga resonansen mellan massa och fjädring så att den passar de övriga förutsättningarna för mikrofonen. Omvandlingsprincipen i elektret- och kondensatormikrofoner bygger på att membranets *läge* omvandlas till en spänning. I tryckkänsliga dito låter man lufttrycket få tillträde till membranets ena sida, vilket gör att trycket, oberoende av frekvens, kommer att utöva en kraft på membranet. Omm denna kraft möter en mekanisk kapacitans (=fjädring) kommer membranets läge att bli proportionellt mot trycket vilket ger rak tonkurva. Av denna anledning konstrueras tryckkänsliga kondensator- och elektretmikrofoner så att de arbetar i det fjädringskontrollerade området *under* resonansen mellan membranets upphängning och massa och för att åstadkomma ett stort frekvensområde skall därmed membranet spännas in så hårt som möjligt.

Omvandlingsprincipen i en dynamisk mikrofon bygger på att membranets *hastighet* omvandlas till en spänning. Detta gäller både tryck- och hastighetskänsliga sådana. I en tryckkänslig dynamisk mikrofon bereds lufttrycket tillträde till membranets ena sida, vilket gör att trycket, oberoende av frekvens, kommer att utöva en kraft på membranet. Omm denna kraft möter en mekanisk resistans (=dämpning) kommer membranets hastighet att bli proportionell mot trycket, vilket ger rak tonkurva. Av denna anledning konstrueras rent tryckkänsliga dynamiska mikrofoner så att de arbetar i det resistanskontrollerade området vid eller kring resonans och att denna resonans därmed måste vara hårt dämpad om man vill uppnå ett någorlunda stort frekvensområde.

I en hastighetskänslig dynamisk mikrofon bereds lufttrycket tillträde till membranets båda sidor, vilket gör att membranet kommer att påverkas av en kraft proportionell mot tryckets gradient. Tryckets gradient är i sin tur proportionell mot partikelhastighetens lägesderivata, vilket gör att kraften som verkar på membranet blir proportionell mot frekvensen.

$$F \sim \frac{d}{dx} \sin\left(\omega t + \frac{\omega}{c} x\right) = \frac{\omega}{c} \cos\left(\omega t + \frac{\omega}{c} x\right) \quad (8)$$

Omm denna kraft möter en mekanisk induktans (=massa) kommer membranets hastighet att bli proportionell mot partikelhastigheten, vilket ger rak tonkurva. Av denna anledning konstrueras rent hastighetskänsliga dynamiska mikrofoner så att de arbetar i det masskontrollerade området över resonans och för att åstadkomma ett stort frekvensområde skall man alltså låta membranet vara mycket löst inspönt.

I många mikrofoner används en kombination av tryck- och hastighetskänslighet. Speciellt märks detta i mikrofoner med njurformad riktkaraktäristik, då denna byggs upp av summan av en ”åtta” och rundtagande karakteristisk.

I kompendiet finns en genomgång av olika mikrofontyper i kapitel 10, sidorna 2-7 - 2-11 förklarar plan resp. sfärisk våg och på sidorna 2-24 - 2-25 behandlas stående våg.

Val av mikrofon

Valet av mikrofon avgörs sålunda i varje praktisk situation av flera faktorer. Några frågor man behöver ställa sig är:

1. Är tonkurvan viktig?
2. Är det viktigt med riktverkan för störundertryckning?
3. Skall mikrofonen placeras nära källan?
4. Hur hög brusnivå kan accepteras?
5. Hur mycket distorsion kan tolereras. Detta är viktigt vid extrema ljudnivåer.
6. Vad får den kosta?

Från teoriavsnittet ovan kan vi inse att den perfekta mikrofonen inte existerar, inte ens om den får kosta hur mycket som helst. Det finns ingen mikrofon som duger om punkt 1-3 samtliga besvaras med ”ja”, minst en av punkterna måste väljas bort. Punkt 4 och 6 kommer inte att behandlas under labben.

Labutrustningen

Under labben ska du mäta upp tonkurvan för några olika mikrofoner dels i en tunnel som konstruerats speciellt för att åstadkomma en plan våg, dels i ett normalt rum med närfältsmätning. Denna mätning får dessutom illustrera en del problem med stående vågor i rummet.

Mikrofon och dator

I lablokalen finns några olika mikrofoner samt en referensmikrofon. Referensmikrofonen är en tryckmikrofon och anses "mäta rätt" och de andra mikrofonerna jämförs med denna. På så sätt kommer högtalarnas tonkurva att elimineras.

Tillgängliga mikrofoner:

Dynamisk	(Röd billig)
Dynamisk	(Dyr och fin)
Elektret	(Billig svart liten "mygga")
Kondensator	(Referensmiken B&K)

Dator

I datorn i lablokalen finns programvara ("Tombstone") som kan leverera ett frekvenssvep och ta emot signalerna från de två mikrofonerna. Om den ena mikrofonen är "bra", blir skillnaden i nivå på de två signalerna den "dåliga" mikrofonens tonkurva. Svepprogrammet kan ordna med en sådan skillnadskurva. Programmet kan även fungera som impulsgenerator för att mäta upp den akustiska längden på röret. Signalen till ena högtalaren kan fördröjas (vilket behövs för mätningen med plan våg). Datorprogrammet finns att ladda ner från elektroakustikens hemsida, för den som vill vara väl förberedd.

Mätning med plan våg

För att skapa en plan våg finns ett 2,2 meter långt papprör med en högtalare i vardera ändan. En vanlig teknik för att skapa en plan våg är att försä ett rör med en högtalare i ena ändan och att dämpa ut alla reflexer från den andra. För låga frekvenser är dämpning mycket



Fig 2. Två mikrofoner inhängda i mättunneln. Luckan stängs under mätningen



Fig 1. Mättunneln. I röret åstadkoms en plan våg, nerifrån och uppåt, med hjälp av en högtalare i vardera ändan av röret och en fördröjning

svår att åstadkomma med rimliga rörlängder och vanligt dämpmaterial, så vi använder oss av en sorts aktiv dämpning, med en extra högtalare i andra ändan av röret. Efter lite funderande kan man inse att om man matar högtalaren i andra ändan med en kopia av signalen som tillförts i första ändan, fördröjd lika mycket som löptiden i röret, så kommer reflexionen i teorin att släckas ut helt. Det finns åtminstone två sätt att resonera sig fram till detta:

1. Om man antar att högtalarmembranet stod stilla, skulle vågen som kommer in reflekteras tillbaka in i röret. Denna reflekterade våg får omvänt tecken, så om vi skapar en våg med samma tecken som den infallande genom att röra på högtalarmembranet kommer dessa två vågor att ta ut varandra.
2. Om man tänker sig ett oändligt långt rör så kommer vågen att propagera i röret utan att reflekteras. Om man på ett givet ställe i detta rör sätter in ett högtalarmembran som rör sig precis som luftpartiklarna gör, kommer inget att reflekteras mot membranet. Eftersom membranet isolerar röret från omgivningen, kan man ta bort resten av röret.

Hemligheten som får metoden att fungera är alltså att man fördröjer signalen till högtalare nummer två med precis löptiden från högtalare 1 till högtalare 2 och att de båda högtalarna är identiska och har samma akustiska förutsättningar på baksidan av membranet. Metoden fungerar bra för låga frekvenser och det är tur, för det är ju just låga frekvenser som är svåra att dämpa ut akustiskt. För att kunna mäta även vid högre frekvenser stängs den fördröjda högtalaren av vid en viss frekvens (typiskt c:a 1 kHz) och dessa frekvenser får absorberas av en liten mängd dämpmaterial vid samma ände.

Mätning med komplex/stående våg

Genom att stänga av högtalare 2 som släcker ut den reflekterade vågen i röret kan vi åstadkomma stående vågor i röret. Vid vissa våglängder som motsvarar halvtalsmultiplar av rörlängden kommer vågorna att reflekteras och komma tillbaka till första högtalaren i fas med nästa period. Vid dessa frekvenser uppstår stående våg. Vid andra frekvenser blir relationen mellan hastighets- och tryckfält mycket komplex, vilket kommer att visa sig vid mätningarna.

Mätning med olika mikrofonavstånd

I denna mätning placeras mikrofonerna på 11 respektive 55 cm avstånd från en vanlig fristående högtalare. Rummet har en del stående vågor, vilket troligen kommer att synas på en del mikrofoners frekvenskurvor.

Några beteckningar

Q	Punktkällans volymflöde i m^3/s
ρ_0	Luftens densitet (c:a $1,2 \text{ kg/m}^3$)
c	Ljudhastigheten i luft (c:a 345 m/s)
r	Avstånd till punktkälla i m
ω	Vinkelfrekvens i rad/s
$\vec{e}_r$	Enhetsvektorn riktad radiellt från punktkällan,
p	Ljudtryck i Pa
$\vec{v}$	Partikelhastighetsvektor vars belopp mäts i m/s
$\vec{J}$	Ljudintensitetsvektor vars belopp mäts i W/m^2
Omm	Om och endast om

Utförande av labben

Förberedande mätningar

Häng in en B&K-mikrofon ungefär mitt för luckan. Skicka ut bandbegränsade impulser från datorn till nedre högtalaren. Hur förändras vågformen från mikrofonen när mikrofonens läge förändras i höjddled? Identifiera direkt och reflekterad del i vågformen.

Skicka sedan ut en fördröjd signal till andra högtalaren. Försök släcka ut den reflekterade signalen genom att ändra fördröjning och amplitud på den fördröjda signalen.

Fördröjning: _____ ms.

Enligt förberedelseuppgift borde den ha varit: _____ ms

Amplitudskillnad: _____ dB

Mätningar

Upptagande av tonkurva med B&K-mikrofon som referens. Två typer av mätningar genomförs för de mikrofoner som finns i labbet. Mätning 1 och 2 genomförs alltså för alla mikrofonerna.

1: Plan våg kontra komplex våg.

Sätt in en B&K-mikrofon och en av de andra mikrofonerna. Se till att de befinner sig på samma höjd i mättunneln. Ställ in lämplig fördröjning och amplitudskillnad enligt de förberedande mätningarna. Ta upp ett frekvenssväp och studera de individuella tonkurvorna och nivåskillnaden mellan dem (som motsvarar mätobjektets tonkurva eftersom B&K-miken är så bra).

Slå därefter av den övre högtalaren för att åstadkomma en komplex våg (blandning av stående och plana vågor). Skriv ut tonkurvorna på skrivaren.

Varför påverkas tonkurvan av vågtypen för en del av mikrofonerna, men inte för andra?

2: Mätning med olika mikrofonavstånd (11cm resp 55cm):

Sätt B&K-miken och var och en av de andra mikrofonerna 11 cm ifrån en fristående högtalare. Se till att de befinner sig så nära varandra som möjligt. Ta upp ett frekvenssväp och studera de individuella tonkurvorna och nivåskillnaden mellan dem. Ta sedan upp samma kurvor på 55cm avstånd.

Skriv ut tonkurvorna på skrivaren.

Varför påverkas tonkurvan av mikrofonavståndet för en del av mikrofonerna, men inte för andra?

Förberedelseuppgifter

- Läs igenom och förstå sidorna 2-7 - 2-11, 2-24 - 2-25 och kapitel 10 i kompendiet, samt texten i detta labpek.

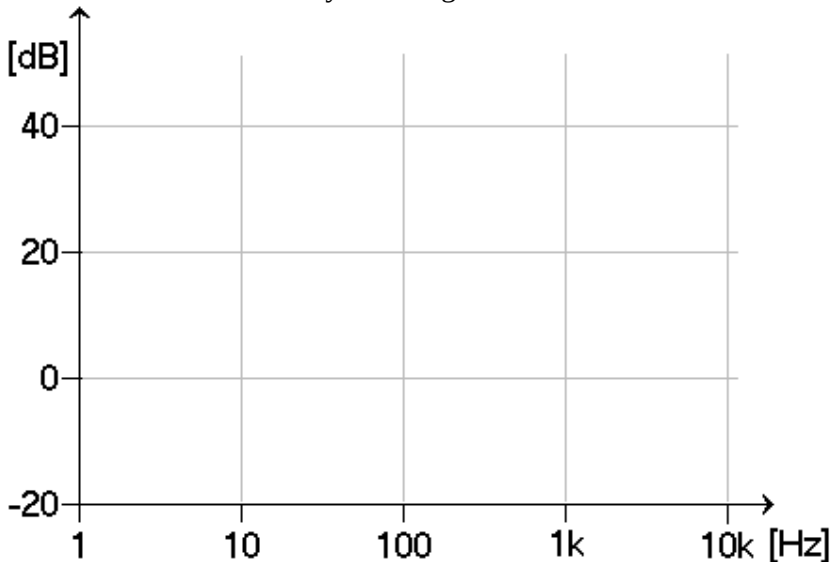
- Fundera grundligt över ekv 1-3. Varför ger inte ena termen $(1/r)$ innanför parentesen i ekv 2. något bidrag till ljudintensiteten?

- Hur åstadkoms den plana vågen i labben och hur gör vi för att kompensera för att röret inte är oändligt långt?

- Hur mycket skall "släcksignalen" fördröjas i den andra högtalaren om röret är 2,2 meter långt?

- Rita spektra nedan för signalen från en rent hastighetskänslig ideal mikrofon placerad 55 cm resp. 11 cm från en punktkälla som avger ett vitt intensitetsspektrum.

- Samma sak för en rent tryckkänslig ideal mikrofon.



- När finns det skäl att använda en riktad mikrofon?

10 - **Förberedelser** - Elektroakustik laboration B1, mikrofoner

- När finns det skäl att använda en rundtagande mikrofon?

- Vilken riktkarakteristik har en ideal, enbart tryckkänslig mikrofon.

- Vilken riktkarakteristik har en ideal, enbart hastighetskänslig mikrofon.

- Hur åstadkommer man njurformad riktkaraktäristik. (=kardiodkaraktäristik.)

- I en tryckkänslig kondensatormikrofon bereds ljudtrycket tillträde till membranets ena sida och membranets *läge* omvandlas till en spänning. Inom vilket frekvensområde relativt den mekaniska resonansen mellan membranupphängning och membranmassa ger en sådan mikrofon rak tonkurva?

- I en tryckkänslig dynamisk mikrofon bereds ljudtrycket tillträde till membranets ena sida och membranets *hastighet* omvandlas till en spänning. Inom vilket frekvensområde relativt den mekaniska resonansen mellan membranupphängning och membranmassa ger en sådan mikrofon rak tonkurva?

- I en hastighetskänslig dynamisk mikrofon bereds ljudtrycket tillträde till membranets båda sidor och membranets *hastighet* omvandlas till en spänning. Inom vilket frekvensområde relativt den mekaniska resonansen mellan membranupphängning och membranmassa ger en sådan mikrofon rak tonkurva?

- Har du verkligen läst igenom kapitel 10 och sidorna 2-7 - 2-11 och 2-24 - 2-25 i kompendiet?
