

Bruk av nye målemetoder for rom- og bygningsakustikk

Ole-Herman Bjor

Norsonic As, Postboks 24, N-3421 Lierskogen

ohbjor@norsonic.com

ISO TC43/SC2 arbeider med en ny standard for bruk av nye målemetoder for rom- og bygningsakustiske målinger: ISO 18233 (DIS). Typiske eksempler er MLS og Swept-Sine. De nye metodene medfører en rekke fordeler sammenlignet med de klassiske målemetodene slik som undertrykkelse av bakgrunnsstøy og utvidet måleområde, med det er også muligheter for feil og upålitelige resultater hvis det ikke tas hensyn til metodenes begrensninger.

Foredraget gir en kort beskrivelse av de nye metodene som blir behandlet i standarden samt en orientering om status for standardiseringsarbeidet.

1 INNLEDNING

De første bygningsakustiske målinger av etterklang og lydisolasjon ble gjort med sinussignaler som eksitasjon. Erfaringen var at slike målinger ble svært upålitelig siden en liten endring av frekvensen (eller temperaturen i rommet) ville gi helt andre verdier. En gikk derfor over til å benytte båndbegrenset støy, gjerne med båndbredde på 1/1 oktav eller 1/3 oktav. Målingen ble mer reproduserbar siden en her midlet over mange rommodi. Det er likevel ikke mulig å reproducere målingen helt nøyaktig siden støyen har en tilfeldig karakter og endrer seg for hver gjentakelse. Støyen har den ønskede forventede frekvensfordeling, men denne er stokastisk fordelt og dette fører til en spredning av sluttresultatet. Midling er derfor nødvendig. Dette er sjelden noe problem siden en også ønsker en romlig midling. Selv om eksiteringen er stokastisk, kan en gjerne betrakte den akustiske transmisjonsveien som deterministisk og lineær. Generelle signalteoretiske metoder kan derfor benyttes for å måle både lydtransmisjon og etterklangsførløp.

Stokastiske metoder for analyse av lydtransmisjon ble utviklet tidlig på 1960-tallet. Slike metoder var likevel vanskelig å anvende på grunn av behovet for stor regnekraft. I dag har dette endret seg med bruk av kraftige digitale signalprosessorer selv i batteridrevne, håndholdte lydmålere. Utviklingen har gjort det mulig å ta disse metodene i bruk enten instrumenteringen er basert på generelle PC-er eller spesialiserte lydmålere.

Den internasjonale standardiseringsorganisasjonen ISO har satt ned en arbeidsgruppe for å utvikle en standard for bruk av slike metoder i rom- og bygningsakustikk. Metoden blir kalt for "Nye målemetoder". Det første forslaget til standard er sendt til medlemslandene for kommentering og avstemming: ISO/DIS18233: "Acoustics — Application of new measurement methods in building and room acoustics". Denne artikkelen gir et sammendrag av metoden som er beskrevet i forslaget til standard.

2 IMPULSRESPONSE

I følge den generelle teorien er et lineært og tidsinvariant transmisjonssystem fullstendig beskrevet ved hjelp av impulsresponsen. Et akustisk transmisjonssystem som består av høyttaler, rom og

mikrofon kan som oftest karakteriseres som et slikt system. Forutsetningen er at signalnivået er innenfor høyttalerens og mikrofonens arbeidsområde og at det verken er vind eller sterke temperaturendringer. Videre er det en forutsetning at høyttaler og mikrofon ikke er i bevegelse. Transmisjonen kan være innen ett rom, som ved etterklangsmåling, eller mellom to rom som ved lydisolasjonsmålinger.

Den “nye metoden” er kjennetegnet ved at en først måler impulsresponsen eller impulsresponsene og at de ulike målestørrelser som lydisolasjon og etterklangstid beregnes basert på disse. Metoden kan anvendes på lyd i rom så vel som vibrasjoner i strukturer. Forutsetningen er at impulsresponsen kan benyttes for å beskrive transmisjonsegenskapene.

3 GENERELL TEORI

3.1 Lyd i et rom

Standarden ISO 140, del 3 – 5 og 9 – 12, beskriver metoder for måling av isolasjonen mot luftbåren støy mellom leiligheter eller gjennom bygningselementer. Metoden baserer seg på eksitering med støy og måling av lydtryknivå og etterklangstid. Måling av etterklangstiden foregår ved at støysignalet står på tilstrekkelig lenge til at nivået har stabilisert seg. Deretter slås eksiteringen av og etterklangsverdien beregnes ut fra hvor hurtig lydnivået i rommet reduseres. I illustrasjonen i Fig. 1 er tiden for avslag satt til $t = 0$. Et slikt nivå/tid diagram inneholder mer informasjon enn bare etterklangstid. Eksiteringsnivået finnes som gjennomsnittet av kurven for $t < 0$.

Den klassiske metoden som beskrevet i ISO 140 beskriver at eksiteringssignalet skal være et støysignal selv om rommet forøvrig er deterministisk. Nivåkurven slik som vist på Fig.1 vil derfor ha en statistisk usikkerhet som kan reduseres ved midling av gjentatte målinger. Som tidligere nevnt kan dette gjøres samtidig med den romlige midlingen.

M.R. Schroeder (Se [1]) har vist at den forventede etterklangskurven basert på støyekksitering kan beregnes direkte ut fra impulsresponsen mellom eksiteringspunkt (høyttaler) og observasjonspunkt

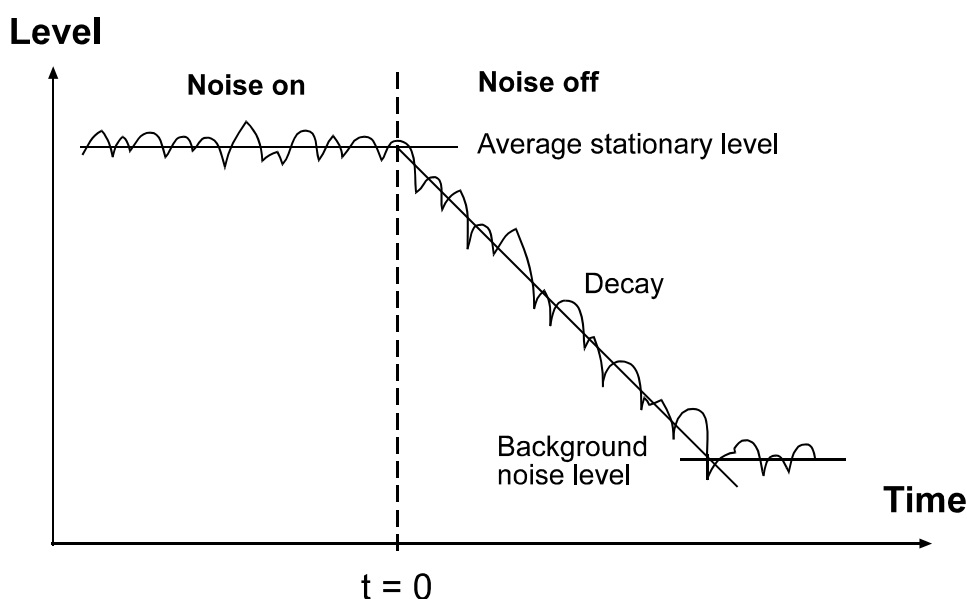


Figure 1 — Typical level versus time curve

(mikrofon). Impulsresponsen kan måles ved én måling uten behov for midlinger. Derved kan en finne både eksiteringsnivå og etterklangskurve. Denne metoden kan også anvendes for lyd mellom rom. Den eneste forskjell er at eksiteringspunkt og observasjonspunkt befinner seg i to rom, men dette bryter ikke forutsetningene om linearitet og tidsinvarians.

Ulike metoder kan brukes for å finne impulsresponsen. En impuls kan benyttes som eksitering og impulsresponsen kan måles direkte, men krav til direktivitet av kilden og krav til signal/støyforholdet gjør at dette sjelden benyttes. Mer vanlig er det å finne impulsresponsen ved bruk av korrelasjonsmetoder eller dekonvolusjon.

I følge Schroeder er forventet nivå ($t \geq 0$) ved støyeksitering gitt av følgende formel:

$$L(t) = 10 \cdot \lg \left[\frac{N_0 \int_t^\infty h^2(\tau) d\tau}{C_{ref}} \right] \quad (1)$$

hvor N_0 er en konstant som beskriver spektraltettheten på eksitasjonssignalet og C_{ref} er en tilfeldig

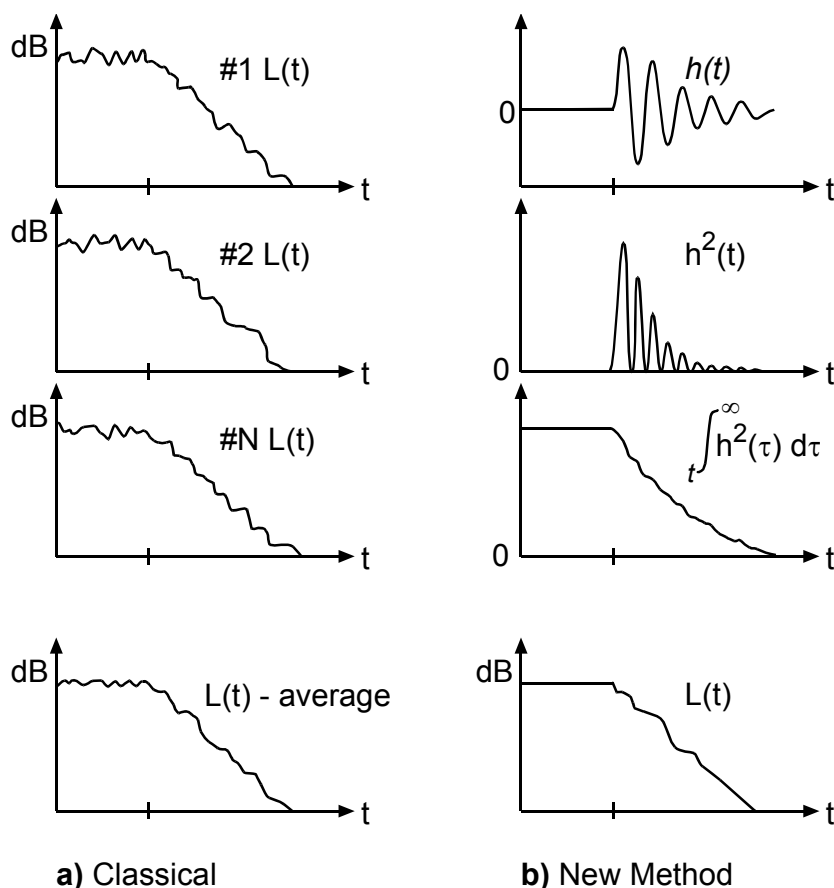


Figure 2. Illustration of the difference between classical and new method. a) In the classical method the expected decay is found by averaging (ensemble) a number of individual decays based on noise excitation. b) By application of the new method, the expected decay is found by processing the impulse response

valgt referanse.

Siden t inngår som start av integrasjonspunktet kan integrasjonen også beskrives som en løpende integrasjon fra $+\infty$ eller en ”bakover-integrasjon”. Historisk ble dette gjort ved å ta opp impulsresponsen på bånd, snu båndet og utføre en analog integrasjon av det kvadrerte signalet.

Ligning (1) kan også benyttes for å beregne det forventede stasjonære nivået før støyen ble slått av. Dette nivået L_0 finnes ved å sette $t = 0$:

$$L_0 = 10 \cdot \lg \left[\frac{N_0 \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{C_{ref}} \right] \quad (2)$$

3.2 Lydtransmisjon mellom to rom

Hvis en støykilde er plassert i senderrommet kan senderromsnivået i punktet S, L_S , beregnes ved bruk av ligning (2) og impulsresponsen mellom senderpunktet og punktet S, $h_S(t)$. Tilsvarende kan nivået i punktet R i mottakerrommet, L_R , beregnes ved bruk av ligning (2) og impulsresponsen mellom senderpunktet og punktet R, $h_R(t)$. Den forventede differansen mellom senderromsnivå og mottakerromsnivå D blir derfor:

I

$$D = L_S - L_R = 10 \cdot \lg \left[\frac{N_0 \int_0^{\infty} h_S^2(\tau) d\tau}{C_{ref}} \right] - 10 \cdot \lg \left[\frac{N_0 \int_0^{\infty} h_R^2(\tau) d\tau}{C_{ref}} \right] = 10 \cdot \lg \left[\frac{\int_0^{\infty} h_S^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h_R^2(\tau) d\tau} \right] \quad (3)$$

4 MÅLING AV IMPULSERESPONS

4.1 Innledning

Som tidligere nevnt er det mange ulemper forbundet med direkte måling av impulsresponsen. Vanligvis benyttes derfor et stasjonært signal fra en høyttaler for eksitering. En kan da ha god kontroll av så vel spektralfordeling som retningskarakteristikk. Ved at rommet tilføres effekt over lang tid kan signal/støy-forholdet bedres og innvirkningen av fremmed støy kan reduseres.

Ulike metoder for å måle impulsrespons er beskrevet i litteraturen. De fleste benytter digital signalbehandling med dekonvolusjon. Metodene krever at systemet er tilnærmet lineært og tidsuavhengig. Høyttaler og mikrofoner må derfor ikke flyttes mens målingen foregår. Vind og raske temperaturendringer kan også skape problemer ved bruk av disse metodene.

4.2 MLS — Maximum Length Sequence

Maximum Length Sequence (MLS) er navnet på en spesiell periodisk, digital sekvens som høres ut som hvit støy. Når denne benyttes for eksitering kan impulsresponsen finnes ved å Hadamard-transformere den målte responsen. Dette er en svært effektiv metode som krever lite regnekraft sammenlignet med andre dekonvolusjonsmetoder

MLS-sekvensen kan karakteriseres ved ordenstallet N , og lengden er $l_1 = 2^N - 1$. Siden signalet er periodisk vil den målte impulsresponsen også bli periodisk. Sekvenslengden må derfor være tilstrekkelig lang for hindre problemer med sirkulær foldning. Også andre grunner relatert til modal tetthet i rommet gjør at sekvenslengden minst bør være lik etterklangstiden.

For å utføre Hadamardtransformasjonen finnes en effektiv metode: "Fast Hadamard Transform (FHT)". Denne ligner på FFT i strukturen, men inneholder bare addisjoner og subtraksjoner. Etter Hadamardtransformasjonen framkommer impulsresponsen direkte. Figur 3 viser en blokk-skjematisk framstilling av signalbehandlingen og samsvarer med implementasjonen i Norsonic *Nor840* analysator.

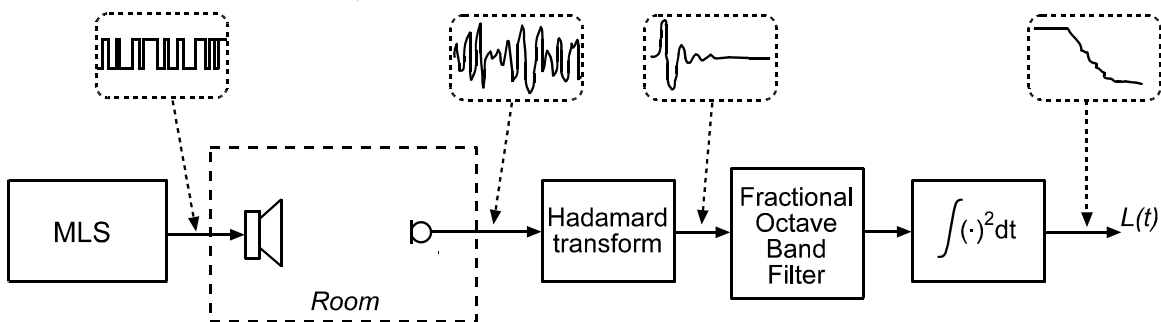


Figure 3 Maximum Length Sequence Method

4.3 Swept-Sine metoden¹

Alle eksiteringssignaler som inneholder tilstrekkelig energi i det aktuelle frekvensområdet kan benyttes for måling av impulsresponsen av lineære tidsinvariante systemer ved hjelp av dekonvolusjonsteknikker. Impulsresponsen kan finnes direkte ved dekonvolusjon eller frekvensresponsen kan finnes ved hjelp av spektral divisjon mellom utgangs- og inngangsspekteret. Impulsresponsen kan deretter finnes ved hjelp av invers Fouriertransformasjon av frekvensresponsen.

Bruk av sveipet sinus har en rekke fordeler og noen ulemper sammenlignet med MLS-metoder. Ulempen er i det vesentlige at metoden krever vesentlig mer regnekraft til signalbehandlingen. Bruk av et sveipet sinus signal gjør målingen vesentlig mer robust for tidsvariasjoner som følge av temperaturrendringer eller vind. Dette er et resultat av at nære spektralkomponenter også vil være nær hverandre i tid. Videre eksisterer det, ved bruk av denne metoden, effektive metoder for å fjerne harmoniske komponenter forårsaket av ulineariteter. Dette gjør at høyttaleren kan drives

¹ En rekke ulike navn har vært benyttet slik som: "chirp", "sinusoidal sweep" og "time-stretched pulse". "Swept-sine method" er forelått i ISO/DIS 18233.

kraftigere uten at forvrengning ødelegger måleresultatet. En kan derfor måle etterklangskurver med dynamikk opp mot 100 dB under gode forhold.

Vanligvis benyttes ett frekvenssveip med konstant amplitude. Frekvensen økes eksponensielt med tiden fra en nedre startfrekvens til en øvre stoppfrekvens slik at hele det aktuelle frekvensområdet blir dekket. Siden et slik sveip vil bruke like lang tid per oktav, vil spektralfordelingen tilsvare rosa støy.

Sveipehastighet

I motsetning til eksitering med periodiske signaler er det ingen øvre grense for sveipehastighet ved bruk av "Swept-sine-metoden". Responsen som benyttes for analysen må imidlertid være tilstrekkelig lang til at også etterlangsdelen av lyden blir med i analysen. Fordelen med et langsomt sveip er at rommet tilføres mer akustisk energi som vil bedre signal/støyforholdet. Ved "Swept-sine-metoden" anbefales det å gjøre ett langsomt sveip i stedet for midling av flere raske. Midling vil medføre økt følsomhet for tidsvariasjoner.

Måling av responsen

Det mottatte signalet må lages for videre analyse. Normal måletid er fra start av frekvenssveipet til det meste av lydenergien fra sveipet har dødd ut. Dette vil tilsvare tiden for sveipet pluss rommets etterklangstid. Figur 4 viser eksitering og respons framstilt i et tid/frekvens diagram. Legg merke til at frekvenskomponentene i responsfunksjonen er forsinket som følge av etterklangen i rommet. Harmoniske komponenter som følge av ulineariteter vil til enhver tid ha høyere frekvens enn grunntonen. Siden de ligger i et område av tid/frekvens diagrammet som ideelt sett ikke skal inneholde komponenter, kan de lett fjernes.

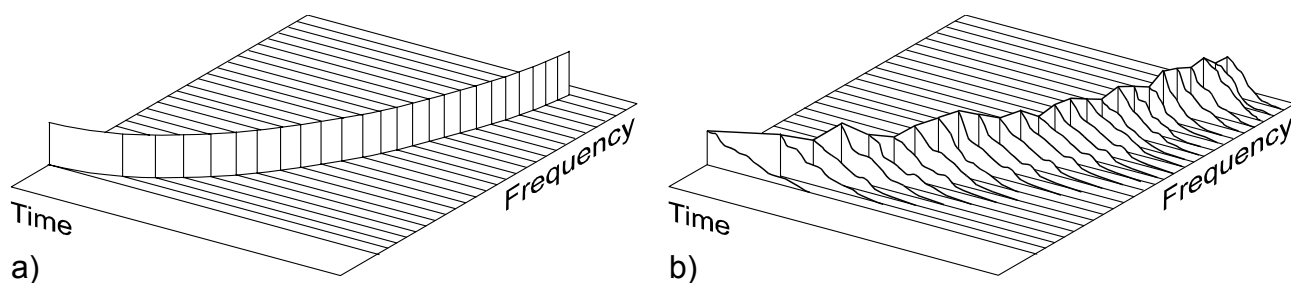


Figure 4 Time frequency diagram for an exponential sweep. Part a) shows the excitation and b) the response.

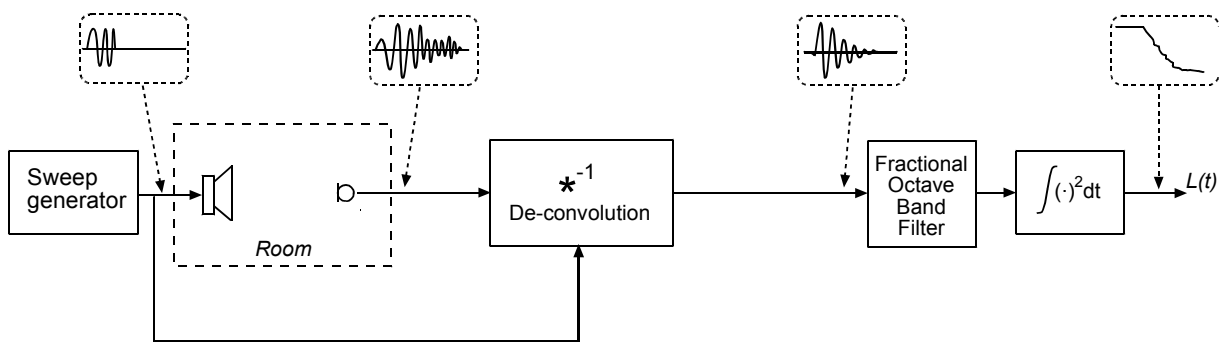


Figure 5 *The-swept sine method*

Dekonvolusion

Signalbehandlingen for å finne impulsresponsen ved hjelp av ”Swept-sine-metoden” er vist på figur 5. Impulsresponsen kan finnes enten ved direkte dekonvolusjon eller ved kompleks divisjon av respons-spekteret og eksiteringsspekteret med etterfølgende invers Fouriertransform. Metoder for fjerning av harmoniske komponenter er også beskrevet i litteraturen, se [3].

5 SAMMENDRAG

Anvendelse av de nye målemetoder som er foreslått i ISO/DIS 18233 muliggjør en rekke fordeler for målinger innen bygningsakustikk: mindre stokastisk usikkerhet, undertrykkelse av fremmed støy og utvidet signaldynamikk. Ved bruk av sveipet sinus kan en også eliminere bidrag fra forvrengninger av signalet slik som harmonisk forvrengning i en høyttaler. Metodens ulemper er øket følsomhet for tidsvariasjoner og derved strengere krav til temperaturstabilitet og vind.

REFERENCES

- [1] Schroeder, M.R., "New Method of Measuring Reverberation Time". J. Acoust. Soc. Am., vol. 37 (1965) pp. 409 – 412.
- [2] Borish, J. and Angell, J.B., "An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise". J. Audio Eng. Soc., vol. 31 (1983) pp. 478 – 488.
- [3] Müller, S. and Massarini, P.: "Transfer-Function Measurement with Sweeps". J. Audio Eng. Soc., vol. 49 (2001) pp. 443-471.
- [4] ISO/DIS 18233: "Acoustics - Application of new measurement methods in building and room acoustics". ISO TC43/SC2



Fig. 6 *Example of an instrument applying the new method for building acoustic measurement. Norsonic Sound analyser Nor121 may be equipped with the swept-sine option.*