

NEDERLANDS AKOESTISCH GENOOTSCHAP

EEN PROGRAMMA-PAKKET VOOR DIGITALE SIGNAALVERWERKING

Ir. K. Verhulst

Technisch Fysische Dienst TNO-TH, Delft

Summary A software-package for digital signal analysis.

The use of a digital analysing system by many users makes it necessary that the software for different purposes is uniform in use. Easy use can be made possible by standardization of conditions and interactive programming. In general use of narrow band analysis and further computations from these narrow band analysis are important applications. Another category of important applications is the computation of frequency response-functions and coherency functions. With the latter the influence of extraneous noise can be reduced although this should be used carefully for multy-delay-systems.

On using digital signal analysis it should be taken into account that there are principal differences between analog and digital analysis like caused by sampling in discrete time intervals.

1. Inleiding

In de akoestiek worden vaak problemen ondervonden bij het analyseren van signalen die met analoge apparatuur niet of moeizaam op te lossen zijn. Door het toepassen van computers die tesamen met speciale randapparatuur en programmatuur aangeduid worden als digitale analyse

systemen heeft het toepassen van speciale technieken een grote vlucht genomen. Door het groter worden van het pakket signaalverwerkingsmogelijkheden wordt aan de ene kant de taak van de akoesticus er niet gemakkelijker op maar krijgt hij aan de andere kant meer gegevens om inzicht te krijgen in zijn probleem. Als toepassingsgebieden kunnen genoemd worden het onderzoeken van fijnstructuren in spectra, het onderdrukken van stoorsignalen, onderzoek aan de overdracht van signalen, bronidentificatie, bronlocalisatie, onderzoek aan structuren bij het gebruik van geluid als hulpmiddel en verwerking en opslag van grote hoeveelheden akoestische gegevens (databank).

De veelheid van mogelijkheden en het toepassen van soms diepgaande theorieën is aanleiding voor vele eigenaars van een digitaal analyse systeem de verwerking van de akoestische signalen over te laten aan enkele specialisten. Als dit niet het geval is dient daar rekening mee gehouden te worden. Als voorbeeld dient het programmapakket zoals dat bij de TPD in gebruik is, waaraan de filosofie ten grondslag ligt dat iedere gebruiker van de signaalverwerkingsfaciliteiten weliswaar geen specialist hoeft te zijn op dat gebied, maar wel dient te weten welk signaal en vooral hoe zijn signaal geanalyseerd wordt. Dit kan bereikt worden door de gebruiker zelf zijn analyses te laten uitvoeren.

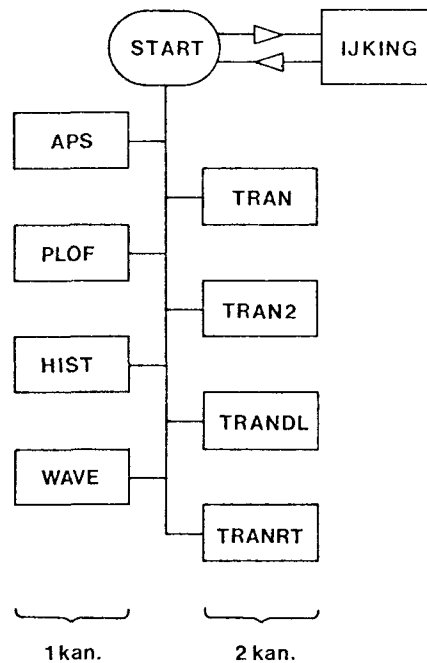
Bij de opbouw van de programma's staat steeds voorop dat het gebruik eenvoudig moet zijn maar toch flexibel in de toepassingsmogelijkheden. Aan deze eisen wordt zoveel mogelijk voldaan door de invoering van standaardcondities en door de programma's uniform te houden, wat betreft het interactief gebruik van de programma's. Flexibiliteit kan verkregen worden door ontsnappingsmogelijkheden in de standaardprocedure.

Flexibiliteit kan mede verkregen worden door de gebruikte programmeertaal; bij de TPD wordt hiervoor TSL (Time Series Language) gebruikt. TSL werkt met een z.g. incrementele compiler waardoor ingetypte opdrachten ook direct uitgevoerd kunnen worden.

2. Analyse pakketten

2.1 Inleiding

Een overzicht van het pakket vinden we in figuur 1. Voor vrijwel alle analyses zijn de resultaten van dit pakket ofwel eindprodukt of een tussenprodukt voor verdere bewerking met daarvoor geschikte routines. In dit pakket is START de centrale routine waar steeds mee begonnen wordt.



Figuur 1. Schema van analyse pakketten

Ieder blok in het schema is een pakket routines dat uitgewisseld kan worden met START. IJKING is een pakket dat calibratiesignalen verwerkt op een zodanige wijze dat alle resultaten van alle analysepakketten automatisch gec calibreerd zijn. APS (voor een vermogenspectrum) PLOF (voor een energiespectrum), HIST (voor een amplitu- deverdeling) en WAVE (voor middeling in het tijddomein) zijn pakketten die analyses op één signaal uitvoeren terwijl TRAN, TRAN2, TRANDL, TRANRT pakketten zijn die analyses op twee signalen uitvoeren (o.a. frequentierespon- sies en coherentiefuncties).

2.2 Het verloop van een analyse

In figuur 2 is een voorbeeld gegeven van het verloop van de procedure in de meest eenvoudige vorm. Hiermede wordt een vermogensspectrum bepaald van 0-1000 Hz met een oplossend vermogen van 4 Hz. Er vindt geen ijking plaats zodat het spectrum gec calibreerd wordt in volt zoals het signaal aan de ingang wordt aangeboden.

```

START
*****1

ANALYSE PROGRAMMA-PAKKET
*****

  PAKKET KEUZE           : APS
  GROOTHEID KANAAL A    : F
  HOOGSTE FREQUENTIE    :
  ? 1000.
  BEMONSTER FREQUENTIE  : 4095.
  FILTER FREQUENTIE     : 1000. [ -3 DB-PUNT ]

      I3  I4  I5  I6  I7  I8  I9  I10  I11  I12  I13  I14  I15
      1   0 320  0   0   7   0   1  55   1   6   1 1024
NU IJKEN ?N
>APS
16
VERZW. STAND ?

? 80
>

```

Figuur 2. Het verloop van een analyse procedure

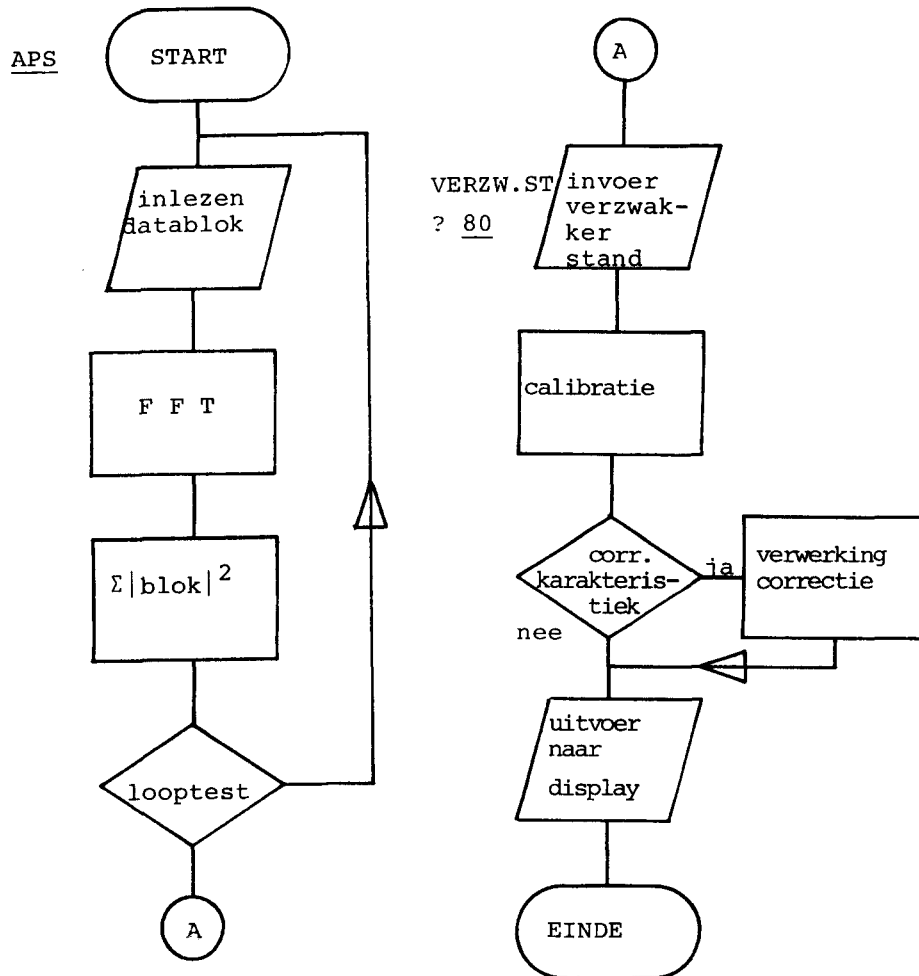
Bij de pakketkeuze maakt de bedienaar een keuze uit het schema van fig. 1. De grootheid die bij het signaal hoort (druk, versnelling enz.) moet opgegeven worden ten behoeve van grafieken en voor het referentieniveau bij decibelberekeningen. Na opgave van de hoogste frequentie wordt de eerst volgende hogere filterfrequentie bepaald waarna de bemonsterfrequentie 4x de filterfrequentie gemaakt wordt. Na de bemonster- en filterfrequentie worden alle condities, die standaardcondities zijn als ze niet uit expliciete opgave volgen, in codevorm gegeven (I3 t/m I15). De codes kunnen ter controle in tabellen teruggevonden worden. Als in het voorbeeld I4 0 is, betekent dit dat een rechthoekig tijdvenster gebruikt wordt, dit in tegenstelling tot een Hanningvenster. De overige codes leveren de volgende condities op: het aantal middelingen: 320, AC/DC koppeling: AC koppeling, foutmelding bij overflow?: ja, triggeren?: nee, bemonsteringen gebufferd inlezen?: ja, ingangsgevoeligheid: $2V_p$, blok-grootte: 1024.

Bemonsteringen gebufferd inlezen betekent dat terwijl een groep bemonsteringen verwerkt worden de volgende groep reeds ingelezen wordt om tijd te sparen; dit kost echter meer geheugenruimte. De standaardgevoeligheid van $2V_p$ is bij signalen van een bandrecorder vrijwel altijd passend.

Een blok-grootte van 1024 is de grootste blok-grootte die bij alle programma's gebruikt kan worden zonder problemen met de geheugenruimte. Voor sommige pakketten kan deze waarde opgevoerd worden tot 8192.

Op de vraag NU IJKEN? wordt ontkennend geantwoord waarna de calibratiefactor 2 wordt gemaakt om te corrigeren voor de helft van een dubbelzijdig spectrum. Hierna worden alle startroutines gewist en volgens opgave bij

"PAKKET KEUZE" alle APS routines geladen.
 Door het intypen van "APS" wordt het inlezen en ver-
 werken gestart.



Figuur 3. Stroomschema van APS voor het bepalen van een vermogenspectrum

Het inlezen kan zonodig voortijdig beëindigd worden door het indrukken van de "S"-toets op de terminal. In het voorbeeld is de "S"-toets gebruikt op het moment dat er 16 middelingen uitgevoerd waren. Als verzwakkerstand moet, wanneer deze niet van toepassing is, \emptyset opgegeven worden. Het gecalibreerde spectrum verschijnt dan op een scherm, waarna nieuwe commando's gegeven kunnen worden. In figuur 3 is als voorbeeld het stroomschema van APS opgenomen. De stroomschema's van vrijwel alle analyse routines zijn gelijk; ze verschillen alleen in hetgeen in sommige vakjes is ingevuld.

2.3 Uniformiteit

In de inleiding is reeds gesteld dat de routines uniform dienen te zijn: dit houdt in dat de routines op dezelfde manier aangeroepen worden en dat op dezelfde manier vragen beantwoord worden en dat de routines overigens op dezelfde manier gebruikt worden. Zo kan bijvoorbeeld bij alle routines die signaal inlezen het inlezen beëindigd worden door het indrukken van de "S" toets. Verzwakkerstanden worden na het inlezen opgevraagd. Alle TRAN routines hebben meerdere spectra als resultaat, deze zijn bij alle versies hetzelfde. Achteraf kunnen ze door het intypen van een letter op het scherm zichtbaar gemaakt worden. Dit zijn steeds

A: spectrum van kanaal 1

G: spectrum van kanaal 2

X: kruisspectrum

T: frequentieresponsie

C: coherentiefunctie

CB: coherent uitgangsspectrum

Er zijn echter wel afwijkingen zoals in START waar bij opgave van PLOF als pakket-keuze om triggergegevens gevraagd wordt of als een TRAN versie wordt opgegeven

wordt om twee grootheden gevraagd en na het inlezen wordt om twee verzwakkerstanden gevraagd. Een minder voor de hand liggende afwijking vinden we bij TRANRT waar voorafgaand aan het inlezen een extra laadcommando gegeven moet worden omdat de routines tijdens de analyse wisselen.

2.4 Flexibiliteit

Flexibiliteit wordt verkregen door ontsnappingsmogelijkheden aan de standaard procedure. De eerste ontsnappingsmogelijkheid is bij de opgave van de hoogste frequentie; wanneer deze negatief is kunnen alle condities behalve de analyse frequentie en de pakketkeuze gewijzigd worden, door opgave buiten het gebied van 5 Hz tot 50 kHz kunnen bemonsteringen en filterfrequentie gekozen worden met meer variatiemogelijkheden. Bij opgave van een frequentie van 0 Hz dienen alle analyse parameters afzonderlijk opgegeven worden.

Als op de vraag NU IJKEN? bevestigend wordt geantwoord kunnen in antwoord op vragen verschillende soorten calibraties worden uitgevoerd:

- 1e. een niveauijking met een bekende akoestische bron voor één frequentie (pistonfoon, triltafel)
- 2e. een niveauijking met een bekende elektrische bron voor één frequentie gecombineerd met de transducentgevoeligheid
- 3e. een frequentieijking met een bekend elektrisch breedbandig signaal in combinatie met 1e. of 2e.
- 4e. een niveau en frequentiecalibratie met een bekend elektrisch breedbandig signaal samen met de gevoeligheid van de transducent.

3 Verschillen tussen digitale signaalverwerking en analoge signaalverwerking

De eenvoud in het gebruik mag de gebruiker niet in de verleiding brengen te vergeten dat er toch nog verschillen zijn tussen analoge en digitale technieken. Uitgebreide informatie over dit onderwerp kan gevonden worden in literatuur [1] en [2].

De belangrijkste zijn de volgende:

a) De signalen worden op discrete tijdstippen bemonsterd waardoor niet bepaald kan worden wat er tussen deze tijdstippen gebeurt. Signalen met een frequentie hoger dan de halve bemonsterfrequentie worden gespiegeld t.o.v. de halve bemonsterfrequentie (= Nyquist frequentie).

Het risico dat dit effect optreedt kan door een analogoog laagdoorlaatfiller vermeden worden.

b) Voor frequentieanalyse wordt de fourierintegraal vervangen door een fourierreeks. Dit kan tot gevolg hebben dat b.v. de frequentie van een zuivere toon tussen twee spectrumlijnen invalt waardoor niet de juiste amplitude en frequentie verkregen wordt. Indien bekend is dat het om een zuivere toon gaat, kan de juiste amplitude en frequentie door interpolatie bepaald worden.

c) Voor wat betreft de verwerkingscondities zijn er een aantal die identiek zijn bij analoge signaalverwerking (ingangsgoedigheid, triggeren, AC/DC koppeling, overflow melding en middelen), maar er zijn er ook een aantal afwijkend:

- De blok grootte, deze bepaalt het aantal frequentielijnen
- De bemonsterfrequentie, deze bepaalt de hoogste te analyseren frequentie

- De twee voorgaande condities bepalen samen het oplossend vermogen in het frequentiedomein volgens $\Delta f = \frac{\text{bemonsterfrequentie}}{\text{blok grootte}}$
- Zoals eerder genoemd is er een analoog laagdoorlaatfilter nodig om het vouweffect (spiegeling rond de Nyquist frequentie) te voorkomen
- Afhankelijk van de beschikbare geheugenruimte kan een gedeelte als buffer gebruikt worden waardoor de verwerking sneller kan gebeuren
- In plaats van een rechthoekig tijdvenster kunnen de bemonsteringen naar keuze gewogen worden in de tijd. Een lijn in het spectrum heeft zijlobben die door de keuze van het tijdvenster beïnvloed worden. Meer hierover kan gevonden worden in lit. [3].

4 Toepassingsmogelijkheden van het pakket

4.1 Globaal overzicht

Naast een globaal overzicht zullen enkele belangrijke toepassingen en eventuele beperkingen besproken worden. Onderscheid kan gemaakt worden in analyses in het tijd-domein en in het frequentiedomein.

In het tijddomein:

autocorrelatiefunctie door terugtransformatie van het vermogenspectrum (APS)

toepassing: detectie van periodieke signalen

cepstrum door terugtransformatie van de logaritmische van het vermogenspectrum (APS)

toepassing: detectie van echo's en periodiciteit in signalen.

amplitudeverdeling (HIST)

toepassing: controle van calibratiesignalen en onderzoek aan bijzondere signalen.

kruiscorrelatiefunctie: door terugtransformatie van

het kruisspectrum (TRAN..)

toepassing: bepalen van looptijden voor b.v. lokalisatie van een bronplaats.

In het frequentiedomein:

vermogenspectrum (APS)

toepassing: frequentieanalyse van stationaire signalen (zie ook 4.2)

energiespectrum (PLOF)

toepassing: frequentieanalyse van kortstondige signalen

frequentieresponsie (TRAN..)

toepassing: onderzoek aan de overdracht van signaal in een bepaald systeem.

kruisspectrum (TRAN..)

toepassing: tussenresultaat voor de kruiscorrelatiefunctie of na verdere verwerking voor het bepalen van het afgestraald vermogen van een plaat.

coherentiefunctie (TRAN..)

toepassing: bronidentificatie

coherentuitgangsspectrum (TRAN..)

toepassing: frequentieanalyse met onderdrukt stoorsignaal (zie ook 4.3)

4.2 APS

Het pakket APS dient voor frequentieanalyse van stationaire signalen, over het algemeen met een groter oplossend vermogen dan met analoge apparatuur. Dit om bijvoorbeeld informatie te krijgen over de fijnstructuur van het frequentiespectrum of voor het opsporen van zuivere tonen. Door het vergroten van het oplossend vermogen kunnen zwakkere zuivere tonen gedetecteerd worden. Immers zuivere tonen hebben een amplitude die

onafhankelijk is van de bandbreedte, terwijl voor stochastische signalen de amplitude evenredig is met de bandbreedte.

Een andere toepassing is die waarbij spectra gecombineerd moeten worden. Dit moet vaak met voldoende groot oplossen vermogen gebeuren omdat door middeling of sommatie in te grote bandbreedtes fouten kunnen ontstaan. Hiervoor is een analoge smalle band analysator nauwelijks te gebruiken terwijl er veel situaties zijn waarbij het nodig is. Daarbij kan gedacht worden aan het bepalen van overdrachtfuncties wanneer het zendspectrum niet vlak is, of bij het bepalen van een isolatie of tussenschakeldemping. Indien nodig kan het eindresultaat alsnog in tertsbanden gesommeerd of gemiddeld worden.

4.3 TRAN

Eén van de resultaten van TRAN is de frequentieresponsie. Deze kan met de volgende relatie bepaald worden:

$$Y(f) = H(f) X(f)$$

$X(f)$ fouriergetransformeerde v.h. ingangssignaal

$H(f)$ frequentieresponsie

$Y(f)$ fouriergetransformeerde v.h. uitgangssignaal

Als we beide leden vermenigvuldigen met de complex toegevoegde van $X(f)$ ontstaat:

$$Y(f) X^*(f) = H(f) X(f) X^*(f)$$

De fouriergetransformeerden komen tot stand door integratie over een tijdinterval van $-\infty$ tot $+\infty$. Voor stationaire signalen is de integraal niet convergent, maar dat kan verkregen worden door te delen door het integratie-interval; we krijgen dan spectrale dichtheden

$$S_{xy}(f) = H(f) S_{xx}(f)$$

Als we S_{xx} , S_{yy} en S_{xy} eenmaal hebben kunnen we met de hiervoor afgeleide vgl. H bepalen maar ook de coherentie-

$$\text{functie } \gamma_{xy}^2 = \frac{|S_{xy}|^2}{S_{xx} S_{yy}}$$

en het coherentuitgangsspectrum

$$\gamma_{xy}^2 S_{yy} = \frac{|S_{xy}|^2}{S_{xx}}$$

Nu zal eerst in het kort aangegeven worden hoe S_{xx} , S_{yy} en S_{xy} tot stand komen.

In de praktijk is T noodgedwongen eindig we krijgen daardoor een schatting van S.

In fig. 5 staat een willekeurig signaal $x(t)$ en $y(t)$ getekend gedurende een bepaalde tijd T waargenomen.

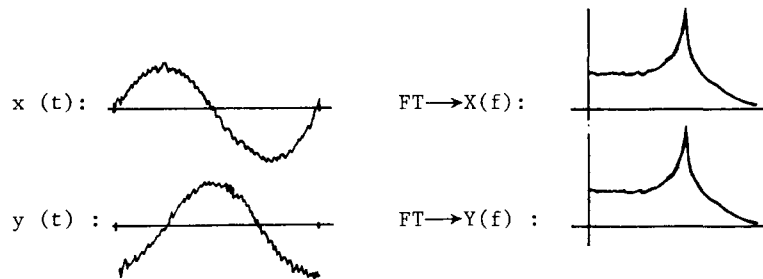
Deze beide stukken signaal worden fouriergetransformeerd waardoor de fouriergetransformeerden $X(f)$ en $Y(f)$ ontstaan; dit zijn beide complexe functies.

Dit proces herhalen we voor steeds een nieuw stukje signaal. Op de resultaten die achtereenvolgens ontstaan kunnen we de volgende bewerking toepassen:

$$\frac{1}{n \cdot T} \sum_n X^*(f) \cdot X(f) = S_{xx} \quad \left(= \frac{1}{n \cdot T} \sum_n |X(f)|^2 \right)$$

$$\frac{1}{n \cdot T} \sum_n Y^*(f) \cdot Y(f) = S_{yy}$$

$$\frac{1}{n \cdot T} \sum_n X^*(f) \cdot Y(f) = S_{xy}$$



Figuur 5: Twee signalen met hun fourier getransformeerden

S_{xx} en S_{yy} bevatten alleen amplitude informatie in tegenstelling tot S_{xy} . Dit is een complexe grootte en bevat naast amplitude informatie ook faseinformatie; n.l. de fasehoek voor alle frequenties tussen $X(f)$ en $Y(f)$ gemiddeld over achtereenvolgens bepaalde fouriergetransformeerden. Dit middelen heeft tot gevolg dat wanneer die faseverloop niet stabiel is, door middel van S_{xy} een kleinere absolute waarde krijgt. Als $x(t)$ en $y(t)$ in- en uitgangssignaal zijn van een stabiel systeem en $y(t)$ uitgangssignaal is dat door $x(t)$ veroorzaakt is levert dit een stabiele fasehoek in S_{xy} op. Wanneer $y(t)$ echter bestaat uit stoorsignaal dat niet veroorzaakt is door $x(t)$ dan zal uitmiddeling plaatsvinden en wel ongeveer 10 dB per factor 10 langer middelen.

Door de amplitude van het kruisspectrum te normeren voor het in- en uitgangssignaal krijgen we de coherentiefunctie, dit is een maat voor hoeveel er uitgemiddeld is. De coherentiefunctie kan geïnterpreteerd worden als de fractie van het gemiddelde kwadraat van het uitgangssignaal dat veroorzaakt wordt door het ingangssignaal voor frequentie f . Door nu de coherentiefunctie te vermenigvuldigen met het uitgangsspectrum krijgen we het coherente uitgangsspectrum. Met deze functie wordt een uitgangsspectrum verkregen dat gezuiverd is van bijdragen van vaak ongewenste andere bronnen.

Er kunnen echter problemen ontstaan omdat alleen twee bij elkaar synchroon ongelezen blokken met elkaar vergeleken worden. Dit betekent dat wanneer er een zuivere looptijd in het systeem aanwezig is, het laatste deel van het ingangssignaal aan de uitgang niet waargenomen wordt.

Eveneens wordt in het begin van het uitgangssignaal een gedeelte waargenomen dat veroorzaakt is door ingangssignaal dat vóór het begin van de bemonstering al aangeboden is. Een stukje ingangssignaal en een stukje uitgangssignaal wordt als vreemd signaal beschouwd en veroorzaken verlaging van de coherentiefunctie (zie ook lit. [4]).

Voor het toepassen van TRAN betekent dit dat storingsonderdrukking goed mogelijk is, maar dat er beperkingen zijn wanneer het een systeem betreft met late reflecties zoals in sterk galmende systemen. Bij het opzetten van een meting dient hier rekening mee gehouden te worden; soms is het mogelijk dit probleem door de keuze van een geschikt testsignaal te omzeilen. Storingonderdrukking tot 25 dB is in de praktijk mogelijk gebleken.

Conclusie

Een digitaal analyse systeem biedt vele, vaak nieuwe, mogelijkheden voor de akoesticus. Door het stroomlijnen van de programma's en het gebruik van de mogelijkheden tot interactief werken wordt het gebruik van een digitaal analyse systeem vaak net zo eenvoudig als het werken met een parallelanalysator.

LITERATUUR

- [1] Bendat, J.S. and Piersol, A.G. (1966), "Measurement and Analysis of Random Data", New York:Wiley-Interscience
- [2] Otnes, R.K., and Enochson, L. (1972), "Digital Time Series Analysis", New York: Wiley - Interscience

- [3] Burgess, J.C. (1975), "On Digital Spectrum Analysis of Periodic Signals", J. Acoust. Soc. Am., 58, 556-567
- [4] Halvorsen, W.G. and Bendat, J.S. (1975), "Noise Source Identification Using Coherent Output Power Spectra", Sound and Vibration 9, 15-24.