

Actieve geluid- en trillingsreductie met piëzo actuator arrays in lichtgewicht panelen

Overmatig geluid van trillende panelen wordt doorgaans gereduceerd door het toevoegen van gewicht. Vaak is het toevoegen van gewicht ongewenst, zoals in auto's en vliegtuigen, waar het leidt tot een toename van het brandstofverbruik. Actieve panelen kunnen bij een gelijk gewicht leiden tot lagere geluidsniveaus dan standaard passieve panelen. Ook in lichtgewicht constructies voor precisietechnologie kunnen de trillings- en geluidreducerende eigenschappen van belang zijn. Daarbij wordt gebruik gemaakt van piëzo-elektrische 'patch' actuatoren die leiden tot zeer compacte en dunne panelen.

• A.P. Berkhoff¹ •

Inleiding

Actieve geluidbeheersing met luidsprekers en microfoons is inmiddels een standaard techniek, hoewel het aantal toepassingen nog klein is. Op dit moment zijn naar schatting 600 kleine passagiersvliegtuigen uitgerust met een antigeluid-systeem. Het antigeluid-systeem reduceert het geluid in een groot gedeelte van het vliegtuiginterieur. Vooral bij kleine passagiersvliegtuigen met propelleraandrijving is er sprake van hoge en hinderlijke geluidsniveaus in het interieur. Een technisch voordeel bij systemen voor dit soort propeller-vliegtuigen is de periodiciteit van het geluid, hetgeen leidt tot relatief eenvoudige regelalgoritmen. Desondanks zijn de in vliegtuigen geïnstalleerde systemen tamelijk complex vanwege het grote aantal luidsprekers en microfoons.

Doorgaans worden tientallen microfoons en luidsprekers gebruikt voor relatief kleine vliegtuigen voor geluidreducties bij frequenties tot enkele honderden Hz.

Het deel van het interieurgeluid in een auto dat wordt veroorzaakt door het band-wegdek contact heeft een ruisachtig karakter. In dat geval is het in principe mogelijk referentie signalen te verkrijgen die voorinformatie geven over het interieurgeluid. Dit wordt echter niet altijd gedaan, zoals

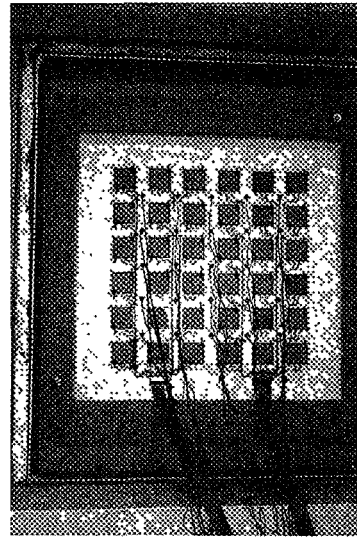
¹ TNO TPD, Divisie Geluid en Trillingen, Postbus 155, 2600AD Delft, berkhoff@tpd.tno.nl en Universiteit Twente, Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica, Postbus 217, 7500AE Enschede, a.p.berkhoff@utwente.nl

blijkt uit de implementatie van Honda voor de Accord Tourer (Sano, 2001). In deze auto wordt het audiosysteem bestaande uit versterkers en luidsprekers gecombineerd met het antigeluidssysteem hetgeen een kosteneffectieve realisatie mogelijk maakt.

Een technisch aanmerkelijk grotere uitdaging is het reduceren van ruisachtig, breedbandig geluid ten gevolge van turbulentie, zoals in het interieur van straalvliegtuigen. Het geluid is hier afkomstig van de straalmotoren en van de turbulentie rond het vliegtuig. In het laatste geval is het niet eenvoudig een referentiesignaal te vinden dat voorinformatie bevat van alle bronnen die bijdragen aan het geluid in het interieur. Alle panelen die significant bijdragen aan een hinderlijke transmissie van geluid van buiten het vliegtuig naar het interieur worden dan actief uitgevoerd. De technologie staat bekend als Active Structural Acoustic Control, waarbij direct de structuur wordt aangestoten door actuatoren teneinde de geluidafstraling te kunnen reduceren. Daarbij worden bij voorkeur ook de sensoren op de afstralende structuur aangebracht in verband met een compacte realisatie van het systeem. Door afwezigheid van een geschikt referentiesignaal worden deze systemen doorgaans ontworpen als feedback systeem.

Actieve panelen met piëzo actuator arrays

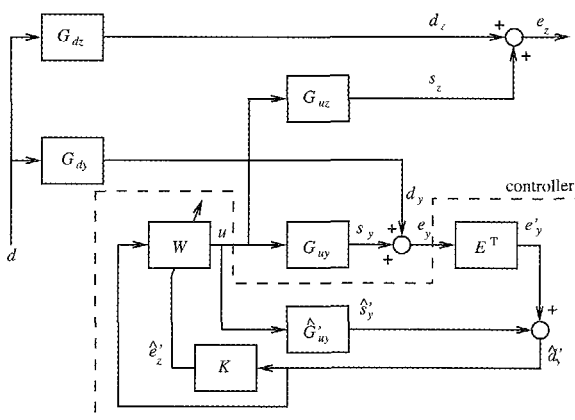
Voor een grote vliegtuigfabrikant zijn door TNO TPD experimenten uitgevoerd voor het reduceren van breedband geluid met behulp van een actief paneel of 'smart panel'. Afbeelding 1 toont een afbeelding van het paneel. Het paneel is bedoeld voor de reductie van geluidafstraling voor frequenties tot 500 Hz. Het is bekend dat reductie van paneeltrillingen niet zonder meer leidt tot een reductie van afgestraald geluid. Reductie van geluidafstraling kan wor-



Afbeelding 1. Sandwich paneel met 30 piezo-elektrische patch actuatoren en 25 versnellingsopnemers

den gegarandeerd bij het gebruik van afstraalmodes. Afstraalmodes zijn de denkbeeldige trillingspatronen van een structuur die het meest efficiënt geluid afstralen. De afstraalmodes hebben in principe niets te maken met de plaatmodes die de trilling van het paneel bepalen; de afstraalmodes zijn wel te schrijven als een gewogen som van de plaatmodes. Bij elke frequentie stralen de modes onafhankelijk geluid af. Daardoor leidt reductie van de sterkte van een enkele afstraalmode tot een reductie van het totale geluid. Een complicatie voor implementatie van een regelstrategie gebaseerd op afstraalmodes is dat de afstraalmodes afhankelijk zijn van de frequentie, hetgeen, voor optimale prestaties van het systeem, dient te worden opgenomen in de regelstrategie.

Een vereenvoudiging van de regelstrategie met gelijkblijvende prestaties kan worden geïmplementeerd met breedband afstraalmodes, die, bij eindige structuren, weliswaar niet volledig onafhankelijk afstralen bij elke frequentie, maar waarvoor kan worden bewezen dat zij leiden tot een reductie van geluidafstraling (Berkhoff, 2002). In tegenstelling tot meer gebruikelijke formuleringen op basis van afstraalmodi leidt deze beschrijving tot een strategie die geoptimaliseerd is voor reductie van breedband geluid in een feedback systeem. Deze techniek biedt drie voordelen ten opzichte van andere methoden gebaseerd op afstraalmodes. Een voordeel is dat de methode is geoptimaliseerd voor breedband geluidafstraling in tegenstelling tot geluidafstraling in een klein frequentiegebied. Een tweede voordeel is dat de breedband afstraalmodes op relatief eenvoudige wijze kunnen worden gemeten. Een derde voordeel is dat de methode geen extra vertraging in de regellus introduceert. Vertraging in de regellus is bij dit soort systemen zeer kritisch vanwege de slechte voorspelbaarheid van het primaire trillingssignaal (dat wil zeggen de paneeltrillingen die leiden

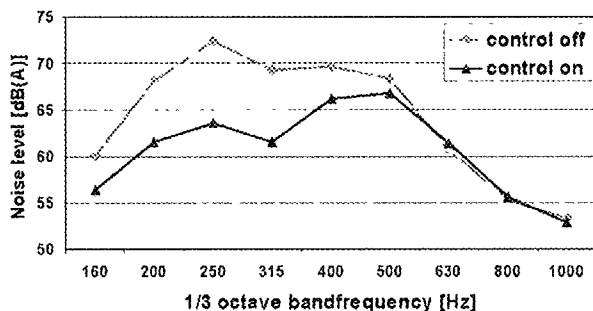


Afbeelding 2. Blokschema van een feedback adaptief regelsysteem voor reductie van breedband geluid dat wordt afgestraald van panelen

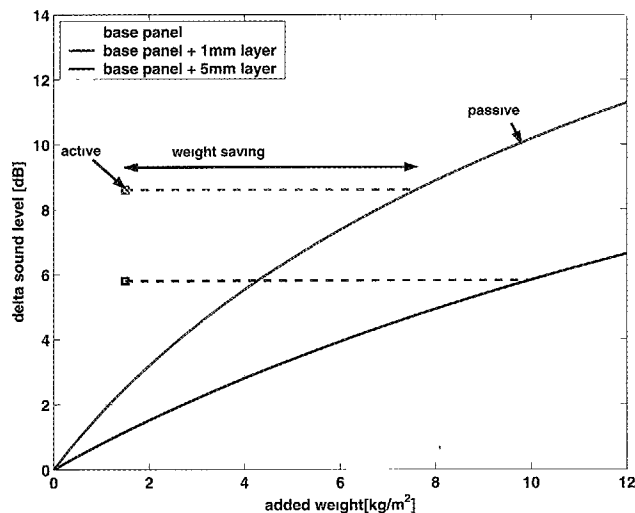
tot geluidafstraling) Het systeem moet dus zeer snel kunnen reageren op veranderingen van het primaire trillingssignaal en extra vertraging leidt dan tot verlies van prestatie.

Een blokschema van een multivariabel adaptief regelsysteem voor de reductie van breedbandgeluid in een feedback configuratie is weergegeven in afbeelding 2. De primaire geluidbron d geeft aanleiding tot paneeltrillingen d_y en afgestraald geluid d_z . De paneeltrillingen worden, via de breedband afstraalmoden, E omgezet in een volledige set referentiesignalen d_y die het ingangssignaal vormen voor de regelaar W . Deze W regelaar levert het stuursignaal aan de piëzo actuatoren. De regelaar wordt adaptief bijgesteld met als doel het minimaliseren van de foutsignalen e_z .

Measured noise levels with base panel in the TNO Delft facility



Afbeelding 3. Afgestraald breedband geluid in tertsbanden van een actief paneel met en zonder regeling



Afbeelding 4. Voorbeeld van een methode om het totale gewicht en akoestische prestatie voor passieve panelen en actieve panelen te kunnen vergelijken

Resultaten

Testen met het actieve paneel van afbeelding 1 werden uitgevoerd in de akoestische testruimtes van TNO TPD en bij de vliegtuigfabrikant. De behaalde geluidreducties op beide locaties waren nagenoeg identiek. Het te reduceren geluidssignaal was afkomstig van het opgenomen geluid in een straalvliegtuig tijdens een vlucht. Afbeelding 3 laat de afgestraalde geluiddruk zien zoals gemeten in de testruimte bij TNO TPD. De resultaten laten zien dat, volgens specificatie, geluidreducties worden gehaald voor frequenties tot ongeveer 500 Hz. De afmetingen van het paneel zijn 1m x 1m x 25mm. De piëzoactuatoren hebben de afmetingen 76 mm x 76 mm bij een dikte van 0.5 mm. De spanningen benodigd om de piëzoplaatjes aan te sturen waren in dit geval gemiddeld 6V, hetgeen ruimschoots onder de maximale spanning van de piëzoplaatjes ligt. Vanwege extreme eisen van redundantie is het aantal transducenten relatief groot. Redundantie bij dit systeem werd getest door willekeurig 3 actuatoren en sensoren gelijktijdig buiten werking te stellen. Daarbij bleek de prestatie slechts niet of nauwelijks (< 0.1 dB) af te nemen.

Het uiteindelijke doel van de experimenten was en is om relatief zware geluiddempende en -afschermende panelen te vervangen door lichtgewicht actieve panelen. Het gewicht van actuatoren, sensoren, en elektronica draagt bij aan het gewicht van het actieve systeem. Het is daardoor van belang om deze elementen zo licht mogelijk te maken. Een methode om het gewicht voor een gegeven akoestische prestatie te vergelijken voor een actief en een passief systeem is weergegeven in afbeelding 4. De isolatie van geluid door een paneel zal in eerste benadering worden bepaald door de massawet, die aanleiding geeft tot de gekromde curves voor de passieve panelen in afbeelding 4. Als de geluidsisolatie van een actief systeem in dezelfde afbeelding wordt uitgezet dan kan snel worden ingezien bij welk gewicht van de elektronica het actieve paneel voordelen biedt ten opzichte van het passieve paneel. Hierbij maakt het wel uit of de elektronica geheel dan wel gedeeltelijk op het paneel wordt aangebracht, omdat deze elektronica dan tevens bij kan dragen aan de passieve geluidsisolatie.

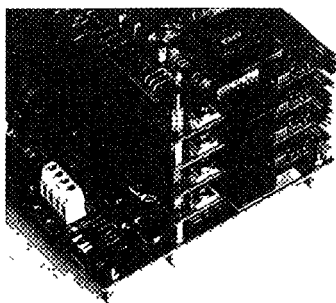
Aangezien het gewicht van de piëzo-elektrische actuatoren relatief groot is, is het efficiënt om het spanningsbereik van de piëzoactuator zo goed mogelijk te benutten. Echter, als de piëzoactuator tot zijn uiterste grenzen wordt aangestuurd dan is het waarschijnlijk dat er niet-lineaire effecten optreden: de relatie tussen de elektrische grootheden en de mechanische grootheden in het piëzo-elektrische materiaal is dan niet langer lineair. Er bestaan versterkerconfiguraties die leiden tot een reductie van de niet-lineaire effecten in het piëzo-elektrische materiaal, bijvoorbeeld die waarbij de

lading op het piëzoelement evenredig is met de spanning op de ingang van de versterker, of waarbij de stroom naar de actuator evenredig is met spanning op de ingang van de versterker. Ook deze versterkerschakelingen leiden niet tot perfect lineaire systemen. Een extra reductie van de niet-lineaire effecten kan worden verkregen door middel van een adaptief algoritme dat niet-lineaire effecten reduceert. Afbeelding 6 toont een gemeten resultaat van een adaptief algoritme voor breedband signalen toegepast op een piëzoelektrische actuator (Annema, 2001; implementatie: R. Kampinga). De niet-lineaire effecten worden in dit geval nog eens 8 dB onderdrukt.

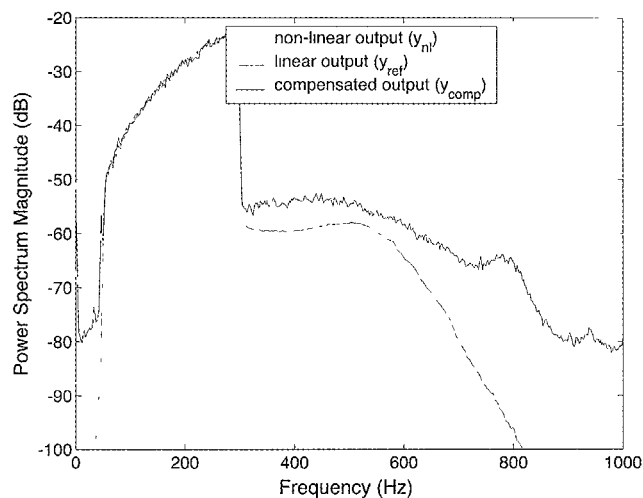
Hardware

Het regelsysteem van het actieve paneel is gebaseerd op een Intel Pentium 4 processor met een RealTime(RT)-Linux besturingssysteem. De regelalgoritmen communiceren met RT-Linux voor analoge Input/Output en met Matlab, van waaruit regelparameters kunnen worden ingesteld en de gewenste signalen kunnen worden bekeken en bewerkt. Deze hardware is vanwege afmetingen en energieverbruik niet geschikt om te integreren met de structuur van het actieve paneel.

Daarvoor in principe geschikte hardware is afgebeeld in afbeelding 6. Deze hardware is door de Universiteit Twente bij de vakgroep Signals and Systems ontworpen met als specifiek doel de implementatie van meerkanaals adaptieve feedback regelaars (Berkhoff, 2003). Het getoonde systeem is ontworpen om een zeer kleine, en stabiele (dat wil zeggen vrij van jitter) vertragingstijd tussen in- en uitgang te kunnen realiseren zonder dat de sample frequentie extreem hoog moet worden gekozen. Dit wordt gerealiseerd door het gebruik van een Field Programmable Gate Array (FPGA) die de communicatie verzorgt tussen een Digital Signal Processor (DSP) en de 32 AD en 32 DA converters. Het systeem is getest bij gelijktijdige sampling en aansturing van 32 kanalen op 100 kHz. Daarbij kunnen de berekende stuursignalen na precies een sampleperiode op de uitgangen worden aangeboden, maar ook na een precies gedefinieerd tijdsinterval dat een fractie is van de samplepe-



Afbeelding 6. Demonstratieopstelling voor compact realiseerbare hardware ten behoeve van adaptieve feedback regelaars met 32 ingangen en 32 uitgangen en kleine vertragingstijd



Afbeelding 5. Spectrale dichtheid van het trillingsniveau van een piezoelektrische actuator met en zonder compensatie van niet-lineaire effecten, als referentie is het geval weergegeven waarin de actuator volledig lineair zou zijn geweest

riode. Het in afbeelding 6 getoonde 32 kanaals systeem bestaat uit een DSP bord met daarop vier modules met elk een FPGA, achtkanaals AD/DA omzetter en anti-aliasing en reconstructiefilters, die vanuit software kunnen worden ingesteld. De volgende stap is om de hardware te integreren met het actieve paneel, hetgeen wordt gerealiseerd door Univ. Twente in een EU 6^e kader project. Daarbij zullen niet alleen gecentraliseerde architecturen aan de orde komen maar tevens architecturen voor gedistribueerde algoritmen en systemen.

Literatuur

H. Sano, T. Inoue, A. Takahashi, K. Terai and Y. Nakamura, "Active control system for low-frequency road-noise combined with an audio system," *IEEE Trans. On Speech and Audio Processing* **9**, No. 7, pp. 755-763

A.P. Berkhoff, "Broadband radiation modes: Estimation and active control," *J. Acoust. Soc. Am.* **111**, pp. 1295-1305, 2002.

A.P. Berkhoff, "Transducer arrays for active structural acoustic control," *Proc. Internoise 2003*, pp. 368-375, 2003.

P. Annema, A.P. Berkhoff and C.H. Slump, "Adaptive nonlinear control of piezoelectric transducers," Presented at the 3rd Symposium on Engineered Adaptive Structures, Quebec, 2001.