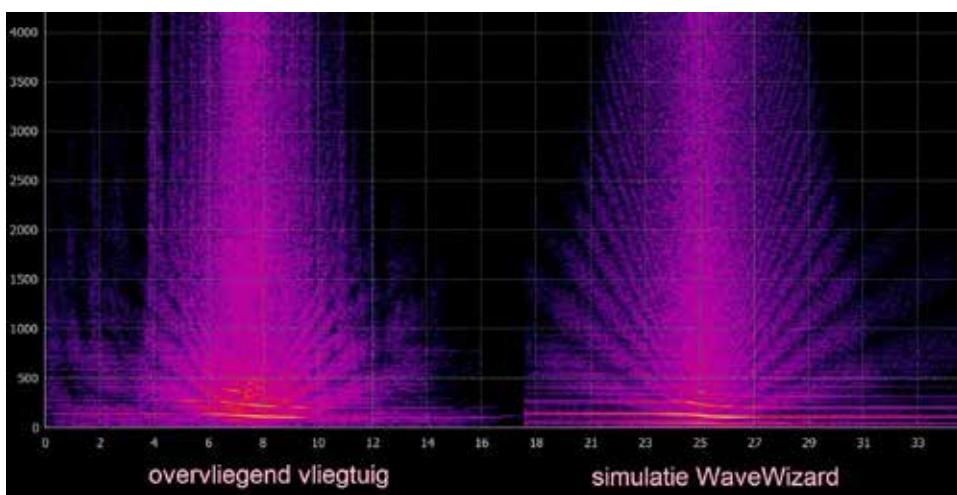


# Het antidopplereffect

## Deel 2

“Computersimulatie is uitgegroeid tot de derde tak van wetenschap, samen met het experiment en de wiskundige afleiding”, aldus de wiskundige Gilbert Strang. Een mooi voorbeeld daarvan is de verklaring van het geluidseffect van een overvliegend vliegtuig. Met de software WaveWizard van de nlt-module *Sound Design* wordt het geluid eerst geanalyseerd en gerepresenteerd in het spectrogram van figuur 1. Daaruit volgt een hypothese over de oorzaak, die ten slotte door een simulatie wordt bevestigd.



Figuur 1

Tijdens de overvlucht van een vliegtuig hoor je niet alleen het geluid van de motor en de propeller, maar ook een suizend geluid, dat we voorlopig maar even het antidopplereffect hebben genoemd (we vinden verderop een meer toepasselijke aanduiding). Dit opmerkelijke effect (het typische ‘overvlieggeluid’) wordt in een spectrogram (zie figuur 1) afgebeeld als een soort kerstboom. De takken daarvan bestaan uit dalende en weer stijgende striemen van ruis, die we waarnemen als een eerst geleidelijk

dalende en dan weer stijgende suistoon. Tussen haakjes, merk op dat de daling van de striemen (links van de stam) *iets* steiler verloopt dan de stijging rechts! Blijkbaar gaat ook antidoppler gepaard met het dopplereffect: een stapvoets overvliegende helikopter zou een nagenoeg spiegelsymmetrische boom hebben opgeleverd. Wat veroorzaakt nu precies die kerstboomvorm, van onder breed en naar de top toe steeds dunner? En hoe moeten we die tak-striemen duiden?

### Atmosferisch filter

Allereerst laat de kerstboomvorm zien dat de atmosfeer werkt als een *laagdoorlaatfilter*.

De lagere frequenties ondervinden tijdens hun transport door de lucht minder weerstand dan de hogere frequenties, ze worden dus ook minder verzwakt. Pas op de kortste afstand zijn ook de hogere frequenties duidelijk te horen. De hoge, spitse vorm van de kerstboom doet vermoeden dat het vliegtuig behoorlijk laag (dus dichtbij de microfoon) is overgevlogen. Op grotere afstand zou de piek stomper en minder hoog zijn geweest. Met behulp van de spectrogramfunctie van WaveWizard in combinatie met formules (1) en (2) in deel 1 is af te leiden dat de snelheid ongeveer 165 km per uur is geweest en de kortste afstand tot de microfoon zo'n 30 meter.

### Een echo-effect is een kamfilter

Maar nu die takken. Als je in het spectrogram één frequentie in de tijd volgt (dus een willekeurige horizontale lijn van links naar rechts, die het volumeverloop van één sinuscomponent met een zekere frequentie voorstelt), dan zie je een vrij regelmatig patroon van afwisselend helderder en weer donkerder, en dus harder en weer zachter wordende tijdsfragmenten. Dit terwijl het toerental van de motor en de snelheid van het vliegtuig constant blijven. Kan er sprake zijn van niet één, maar twee sinussen van dezelfde frequentie die elkaar af en toe even uitdoven? Met andere woorden: zien we hier een *interferentiepatroon*? Zo ja, waar komt die uitdovende, tweede sinus dan vandaan?

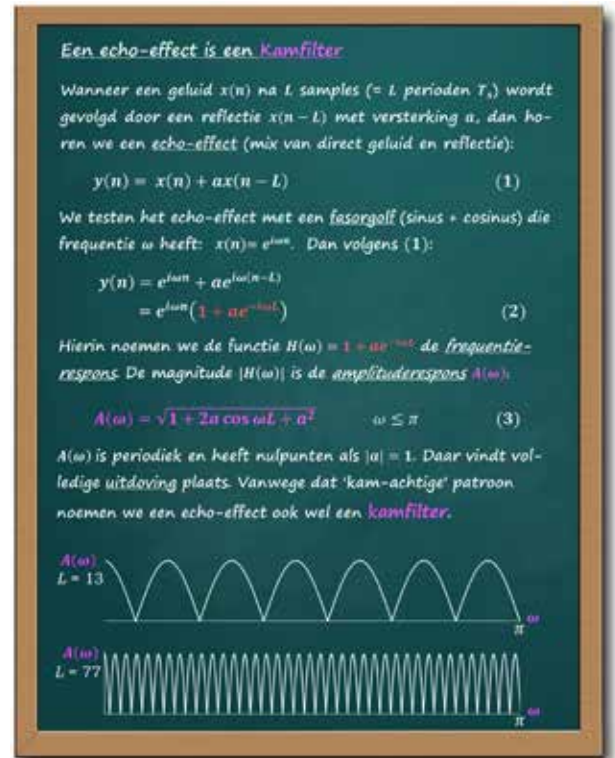
Kan dat een *reflectie* zijn van de eerste? Wel, als er een reflectie in het spel is, dan moet die in het *hele* spectrum werkzaam zijn – en niet bij slechts één frequentie. Neem bijvoorbeeld een blok golf waarvan, net als bij de sinus, de ene halve periode positief en de andere helft negatief is. Als de blok golf reflecteert tegen een muurtje op zodanige afstand dat de positieve helft van de reflectie precies samenvalt met de negatieve helft van de directe golf, dan treedt volledige uitdoving op.

Maar de blok golf heeft boventonen en die worden dus blijkbaar ook allemaal gedoofd. Het echo-effect is dus merkbaar over het *hele* frequentiedomein. In de nlt-module *Sound Design* wordt de *frequentiedomein*-formulering van een echo-effect afgeleid in hoofdstuk 5.4. We vatten dat op het schoolbord van figuur 2 samen en maken daarbij (anders dan in de module) gebruik van de complexe notatie. (Er wordt wel eens gevraagd of in *Sound Design* de Fouriertransformatie wordt afgeleid. Het antwoord is: “op impliciete wijze”, want de frequentieresponsfunctie  $H(\omega)$  (zie figuur 2) is de *discrete tijd-fouriergetransformeerde* van het echo-effect.

**Tijdveranderlijk kamfiltereffect**

Het resultaat van deze beschrijving in het frequentiedomein is de *amplituderessponsfunctie*  $A(\omega)$  (zie figuur 2) die in het geval van een echo, met z'n typische interferentiepatroon, wordt aangeduid als een *kamfilter*. Het heeft een regelmatige ‘tanden’structuur: de maxima liggen op onderling gelijke afstanden, evenals de nulpunten (dat zijn de frequenties waar volledige uitdoving plaatsvindt). Als de echotijd ( $L$ ) kort is, heb je maar weinig tanden en liggen de nulpunten ver uit elkaar. Naarmate  $L$  groter wordt, neemt het aantal tanden toe en komen de nulpunten dicht bij elkaar te liggen (zie figuur 2). Als we nu in het spectrogram van figuur 1 een willekeurig tijdstip kiezen en kijken van beneden naar boven, dan zien we opnieuw een regelmatige afwisseling van helder en donker, dus van amplitudemaxima en -minima: een onmiskenbaar kamfilterpatroon. Kennelijk vindt er dus inderdaad reflectie plaats! Kijken we vervolgens naar een steeds iets later tijdstip, dan veranderen de onderlinge afstanden geleidelijk. Zolang het vliegtuig na-

Figuur 2: Een echo-effect is een kamfilter



dert, komen de minima dicht bij elkaar te liggen: blijkbaar neemt de echotijd toe. Op het moment van passeren is  $L$  maximaal (617), en dus ook de echotijd ( $617 \cdot T_s = 14$  milliseconde). In die tijd overbrugt geluid een afstand van  $3,43 \text{ m/s} \cdot 0,014 \text{ s} = 4,8$  meter. Is het vliegtuig eenmaal overgevlogen, dan worden de tandafstanden weer groter en neemt de echotijd geleidelijk af.

**Koplampen**

Om dit vreemde echogedrag te verklaren, vergelijken we het directe geluid en de reflectie met de koplampen van een naderende auto. Als de auto nog ver weg is, zie je de lampen *naast* elkaar, want hun afstanden tot je oog zijn ongeveer gelijk. Op het moment dat de auto je passeert, is de ene lamp dicht bij je oog dan de andere: het afstandsverschil tussen de lampen is nu maximaal en ongeveer gelijk aan de breedte van de auto. Die breedte is dus te vergelijken met die reflectorafstand van 4,8 meter bij het vliegtuig. Na passeren neemt het afstandsverschil (nu tussen de ‘achterlichten’ en je oog) weer af tot nul.

**Proefje met je NVOX**

Hiermee hebben we het antidopplereffect verklaard. De dalende suistoon moet corresponderen met een toenemende echotijd, en de stijgende met een afnemende echotijd. Dat dit heel aangenaam is, kun je snel zelf controleren: houd deze *NVOX* breed opengeslagen op enkele centimeters van je gezicht, maak een sissend geluid, beweeg je *NVOX* langzaam van je af en weer naar je toe. Je hoort een geluid dat iets weg heeft van een bewegende gasbrander: een suistoon die eerst daalt en vervolgens weer stijgt. Merk op dat de toonhoogte niet afhangt van de

snelheid waarmee je het blad beweegt (zoals bij doppler), maar uitsluitend afhangt van de afstand tot je gezicht, dus van de echotijd. Een betere benaming voor het antidopplereffect zou dus zijn: *tijdveranderlijk echo-effect* of *tijdveranderlijk kamfiltereffect*

**Computersimulatie**

De verklaring van het antidopplereffect werd mogelijk op basis van een zeer rekenintensieve signaalanalyse van een geluidstrilling: met de FFT (zie deel 1) werden 1720 tijdopvolgende spectra berekend, weergegeven in de eerste 17,2 seconden van het spectrogram van figuur 1. Daardoor komt de subtiële structuur van een tijdvariant kamfiltereffect aan het licht, met als belangrijkste conclusie dat het antidopplereffect alleen maar kan ontstaan als gevolg een reflectie tegen een deel van het vliegtuig zelf. Dat wordt geverifieerd in een simulatie waarin twee identieke toon-ruisbronnen met een snelheid van 165 km per uur ‘overvliegen’ op hoogten van resp. 30 en 34,8 meter. Het resultaat is te zien in figuur 1 rechts en te horen op mijn website <http://www.muzeexact.nl>. Daar kun je ook WaveWizard downloaden. De simulatie voer je met slechts één muisklik uit via menu Presets / Anti-doppler. Experimenteer met de instellingen! ●