

Het anti-dopplereffect

Deel 1

```

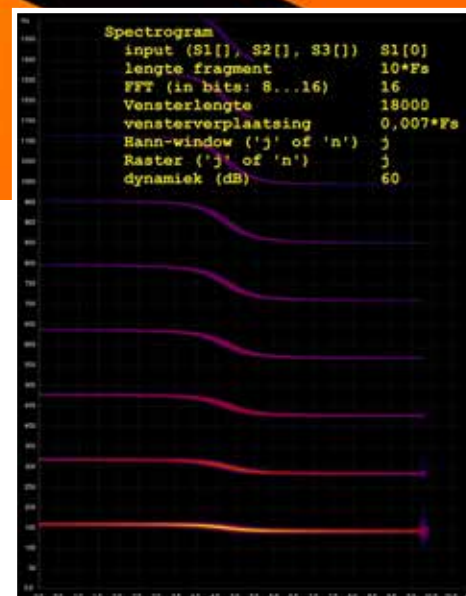
frequentie n
(1) f_m(t)
(2) V(t)

v = 20
x1 = -100
h = 15
f = 150
c = 344

p = v^2
Q = 2*v*x1
R = x1^2 + h^2

Toengenerator
Frequentie
Amplitude
Golfvorm
Spoor: S? [?]
Duur
Aantal harm

```



Figuur 2: Dopplereffect geanalyseerd met WaveWizard's functie Spectrogram

In Hitchcocks ijsingwekkende *Crop Duster Scene* van zijn film *North by Northwest*, waarin Cary Grant wordt aangevallen door een dubbeldeks sproeivliegtuigje, is het verschillende malen duidelijk te horen: het vertrouwde, maar raadselachtige geluidseffect dat precies het tegenovergestelde lijkt te doen van wat schoolboeknatuurkunde ons leert. In twee artikelen analyseren we dit effect en bespreken daarmee ook de hoofdlijnen van de nlt-module *Sound Design*.

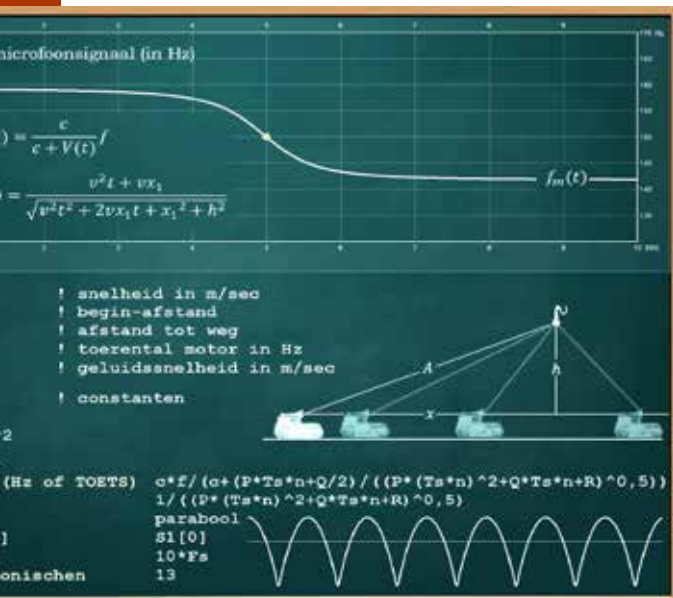
Als een auto je passeert, hoor je de bromtoon van de motor lager worden: het dopplereffect. Voor een overvliegend vliegtuig geldt dat natuurlijk ook. Maar tegelijkertijd doet zich bij het vliegtuig (en bij een helikopter of een paraglider) ook een ander geluidseffect voor. Als het nadert, hoor je, naast de bromtoon van de motor, ook het gesuis van de propeller en de vleugels. Als de afstand tot het vliegtuig niet al te groot is, klinkt in dat suizende geluid iets als een vage

RUTGER TEUNISSEN, sonoloog-onderzoeker, is auteur van de nlt-module *Sound Design* en van de educatieve, gratis audio-sigitaalverwerkingssoftware *WaveWizard*.
Site: www.muziekexact.nl
Contact: RutgerTeunissen@muziekexact.nl

toon door, laten we zeggen: een suistoon. Die gaat sneller en eerder omlaag dan de vertrouwde dopplerverlaging van de motorbrom. Vanaf het moment van passeren wordt het nog gekker: je hoort juist het *tegenovergestelde* van het dopplereffect: in plaats van verder te dalen, zoals de motorbrom, begint de suistoon weer te stijgen! (<https://www.youtube.com/watch?v=sIY7BQkbIT8>). We zullen dit effect voorlopig het 'antidopplereffect' noemen; in deel 2 zullen we een meer toepasselijke naam vinden. Een verklaring voor dit verschijnsel lijkt misschien alleen weggelegd voor akoestici, maar als je een beetje vertrouwd bent met de beginselen van de signaalverwerking, kom je er ook.

Signaalverwerking

Ook al worden er in de nlt-module *Sound Design* wel degelijk 'geluiden ontworpen', toch is de module bedoeld als een introductie in de aanzienlijk breder toepasbare theorie van de discrete signaalverwerking. Door de komst van de computer heeft de signaalverwerking in de afgelopen decennia een wetenschappelijke en technologische revolutie teweeg gebracht. Die ontwikkeling is ingezet vanuit vele vakgebieden en disciplines: wiskunde, informatica, elektrotechniek, meet- en regeltechniek, telecommunicatie, beeldverwerking, spraakherkenning en -synthese, seismologie en medische diagnostiek (MRI). Signaalverwerking moet je dan ook zien als



een van die transdisciplinaire technieken die de samenleving veranderen en ongemerkt van grote invloed zijn op ons doen en denken.

Fourierzintuig

Fundamenteel in de signaalverwerking is de representatie van signalen en (trillings)-systemen in de dubbele vorm van tijd en frequentie. De omrekening van een tijdsignaal naar een frequentiesignaal of andersom, de *fouriertransformatie*, ligt aan de wortel van de theorie van de signaalverwerking.

Waarom uitgaan van audio bij een module over signaalverwerking? Dat kun je aflezen aan de titel die de Franse wetenschapshistoricus Olivier Darrigol gaf aan zijn imposante essay over de ontstaansgeschiedenis van de fourieranalyse: *The acoustic origins of harmonic analysis*. (Darrigol, 2007)

Dat een periodieke functie (een signaal) gerepresenteerd kan worden als een lineaire combinatie van sinussen met harmonische frequenties, is hoorbaar in de vorm van de afzonderlijk waarneembare boventonen. Dat in het binnenoor het tijdsignaal van de trommelvliestrilling wordt getransformeerd tot een ruimtelijk gedistribueerd frequentiesignaal (spectrum) wordt zichtbaar in de anatomie van het slakkenhuis. Een transformatie van tijd naar frequentie ligt dus besloten in de architectuur van het gehoororgaan en is fundamenteel in de geluidspceptie. Kortom: ons oor is ons ‘fourierzintuig’.

Belangrijkste algoritme

Een harde kern van de discrete signaalverwerking is de *Fast Fourier Transform* (FFT), die de Amerikaanse wiskundige Gilbert Strang in zijn boek *Computational Scien-*

ce and Engineering terecht omschrijft als het belangrijkste algoritme van de 20^{ste} eeuw. Tijdens het doorwerken van de module laat een leerling de freeware *WaveWizard* die bij *Sound Design* wordt gebruikt zo’n miljoen keer de FFT-routine aanroepen via de functies *Scoop & Spectrum* en *Spectrogram*. De rekentijd daarvan is iets minder dan één uur en de berekening vindt plaats tijdens een beeldanimatie waarin een oscilloscoop en een *spectrum analyzer* worden gesimuleerd. Zonder de

FFT zou die animatie niet in *realtime* mogelijk zijn en zou de computer 403 uur moeten rekenen. Kortom, de leerdoelen en de inhoud van de nlt-module *Sound Design* zouden niet realiseerbaar zijn zonder de FFT.

Als je de functie Snelle Convolutie van *WaveWizard* gebruikt om de akoestiek van een bestaande concertzaal als stereogalmeffect toe te voegen aan een geluid; dan ligt de rekentijd, dankzij gebruik van de FFT, in de orde van *realtime*. Dat is ongeveer 1000 maal zo snel als de directe convolutie. Dat illustreert waarom de FFT in zeer veel toepassingen de *enabling technology* is.

Zonder FFT geen spectrogram en zonder spectrogram geen gemakkelijke verklaring van het antidopplereffect, zoals we in deel 2 zullen zien. Maar wat is een spectrogram nu eigenlijk?

Tijd-frequentiediagram

Bovenaan op het ‘schoolbord’ in figuur 1 is te zien hoe de toonhoogte van de motorbrom van een auto die op enige afstand passeert, monotoon daalt, eerst langzaam, dan sneller en ten slotte weer langzaam. Dit is een tijd-frequentiediagram waarin, net zoals bij het notenschrift, de toonhoogte (frequentie) is uitgezet tegen de tijd (horizontaal). Dit toonhoogteverloop is de grafiek van $f_m(t)$ volgens formule (1): de frequentie van de toon die door de microfoon werd geregistreerd. Daarin varieert de snelheid $V(t)$ ten opzichte van de microfoon volgens formule (2). Dit is een typische afbeelding van het dopplereffect.

Met *WaveWizard* kun je een toon aanmaken waarvan de frequentie verloopt volgens de formules (1) en (2). Je krijgt dan een *sonificatie* van het dopplereffect. Als je daarbij ook het

volume laat hangen van de afstand tot de microfoon en als golfvorm een parabool kiest, begint die sonificatie al heel aardig te lijken op het geluid van een voorbijrijdende auto: op het moment van passeren klinkt de toon duidelijk het hardst. Merk op dat het tijd-frequentiediagram in figuur 1 géén informatie laat zien over dit waargenomen volumeverloop van de motorbrom.

Spectrogram

Deze sonificatie is een digitaal signaal van 10 seconde (lengtefragment) en wordt geplaatst op geluidsspoor S1 van *WaveWizard*. Vervolgens roepen we de spectrogramfunctie op en zien na enige seconden de afbeelding van figuur 2 op het scherm. Het geluidsfragment wordt verdeeld in 1431 overlappende ‘Vensters’ van 0,4 seconde (vensterlengte), die 7 milliseconde na elkaar beginnen (vensterverplaatsing). Over elk fragment wordt de FFT berekend. Aangezien de parabooltoon boventonen bevat, zijn nu meerdere dopplercurven te zien die allemaal voldoen aan formule (1). De helderheid van een beeldpunt geeft de amplitude van een frequentiecomponent op een tijdstip weer. Het spectrogram is dus een tijd-frequentie-*amplitudediagram*: het laat niet alleen het frequentieverloop maar ook het volumeverloop zien. De amplituden van de boventonen van een parabool nemen af met het kwadraat van hun rangnummer; dus hoe hoger, des te zwakker en dus ook des te donkerder afgebeeld in het spectrogram. Ongeveer zo’n plaatje mag je verwachten als je een spectrogram maakt van de geluidsoopname van een passerende auto. Dit is een enorme doorbraak! Zonder enige wiskundige afleiding en puur op basis van de Fourieranalyse van een geluid kunnen we, precies zoals in figuur 1, de typische frequentieverandering van doppler weergeven als de grafiek van een tijd-functie! Dat brengt ons tot de vraag: “Levert een spectrogram van de geluidsoopname van een overvliegend vliegtuig misschien een bruikbare basis op voor een verklaring en een wiskundige beschrijving van het antidopplereffect?” Het antwoord volgt in deel 2. Wil je daar al vast over nadenken en zelf dat spectrogram maken? Bezoek www.muziekexact.nl en download *WaveWizard*. ●

BRON

Darrigol, O. (2007). The acoustic origins of harmonic analysis. *Arch. Hist. Exact Sci.* (2007) 61:343-424. Berlijn: Springer Verlag.