

Hoofdstuk 17

Ontwikkelingen in signaalbewerking voor geluidswaergave

Ronald M. Aarts

Developments in signal processing for sound reproduction

An overview is given of signal processing for audio coding and sound reproduction. Firstly, Audio coding methods — both ‘loss-less’ and ‘lossy’ (MPEG) — are discussed, including some of their applications like Digital Audio Broadcasting and the ‘hidden channel’.

Secondly, sound reproduction techniques are considered like: stereo-base widening, surround sound reproduction via only two loudspeakers (‘3D surround’) and the reproduction of bass via small loudspeakers with an on psycho acoustics based technique called ‘Ultra Bass’.

Inleiding

Elektronische bewerking van geluidssignalen is niet nieuw. Toonregeling met behulp van één of meer analoge filterbewerkingen is een bekend voorbeeld uit de audiotech-niek. Nieuwere voorbeelden vinden we in het verbeteren van de geluidskwaliteit door beïnvloeding van de ruimtelijke gewaarwording van stereo-effecten en de verbetering van de baswaergave via kleine luidsprekers. Toch is er de afgelopen 25 jaar heel veel nieuws geïntroduceerd. Ofschoon veel van de tot nu toe benodigde basiskennis op het gebied van akoestiek en geluidspceptie reeds voorhanden was, zijn de praktische toe-passingen voor consumentenelektronica een enorme vlucht gaan nemen sinds de introductie van de Compact Disc (CD) in 1981. Immers, de overgang van registratie in digitale vorm naar bewerking in digitale vorm is slechts één stap. We kunnen door toe-passing van digitale signaalbewerking, algoritmes gebruiken die voorheen alleen aan professionele audioapparatuur voorbehouden waren. Die interessante periode van een kwart eeuw valt samen met de periode die de Nederlandse Sectie van de AES nu al weer bestaat. Veel van de leden hebben belangrijke bijdragen geleverd aan de signaal-bewerking, zowel theoretisch als praktisch. Eén van de meest markante ontwikkelingen is wel de theorie van audiocompressie; ook hieraan zijn belangrijke bijdragen geleverd door onze Nederlandse Sectieleden.

We zullen op de bovengenoemde onderwerpen een terugblik werpen, waarvan de conclusie wel moet zijn dat er enorm veel is gebeurd waar we als Nederlandse Sectie met recht trots op kunnen zijn.

Audiocodering

De audiocodering van de CD is 16-bit lineaire pulscodemodulatie (PCM), wat betekent dat voor elk audiomonster ('*sample*') 16 bits worden gebruikt om de waarde ervan weer te geven. Deze methode garandeert een hoge kwaliteit audio. Voor sommige toepassingen is de capaciteit die vereist is om deze bits op te slaan of te verzenden te groot. Om efficiënter met het opslagmedium of transmissiekanaal om te gaan zijn er nieuwe codeermethodes bedacht. Deze methodes zijn onder te verdelen in verliesvrije codes ('*lossless coding*') en codes die na de codeer- en decodeerslag niet exact dezelfde audiobits opleveren ('*lossy coding*'). Deze laatste methode, waarvan MPEG een bekend voorbeeld is, geeft de grootste compressiemogelijkheid. Eind jaren negentig heeft men reeds een reductie met een factor 12 behaald, (vrijwel) zonder dat dit tot hoorbare vervorming leidt. Beide methodes zullen we hierna kort bespreken.

Verliesvrij coderen

Het verliesvrij coderen van gegevensbestanden is een techniek die reeds lang wordt toegepast bij computers. Hierbij is het de bedoeling dat de gegevens gecodeerd worden om vervolgens efficiënt opgeslagen te worden. Dit levert een besparing op van de benodigde hoeveelheid geheugen. Het allerbelangrijkste hierbij is dat na coderen en decoderen de oorspronkelijke gegevens weer exact teruggewonnen worden. Er is dus geen verlies van informatie, vandaar de naam 'verliesvrij coderen'. Fons Bruekers e.a. hebben methoden bedacht om met efficiënte algoritmes zowel PCM-gemoduleerde als 1-bit-audiosignalen zoals '*Bitstream*' of '*Direct Stream Digital*', (die bij de '*Super Audio CD*', de opvolger van de CD gebruikt gaan worden) verliesvrij te coderen en decoderen.

MPEG-audiocodering

Compressie van audiosignalen is zonder meer de belangrijkste stap, na de introductie van de CD, op het gebied van digitale signaalbewerking. Na de komst van de CD geloofde niemand dat het nodig was om audiosignalen te comprimeren, want de opslagcapaciteit was zo groot en van Internet had nog niemand gehoord. Enige tijd daarna kwamen er berichten dat het mogelijk was wel 75% van de bits weg te laten. Dit leidde tot veel ongeloof. Nu is deze situatie drastisch gewijzigd, dankzij de samenwerking van een aantal bedrijven, waarbij ook belangrijke Nederlandse bijdrages werden geleverd. Sinds mei 1988 is de Moving Pictures Expert Group (MPEG) binnen de International Standardization Organization (ISO) bezig om standaarden af te spreken voor de compressie van hoge kwaliteit audio. MPEG-1 gaat over het coderen van stereosignalen met hoge bemonsteringsfrequenties. De standaardisatie van MPEG-1 was rond in 1992 en werd gepubliceerd in 1993 (ISO/IEC 11172-3).

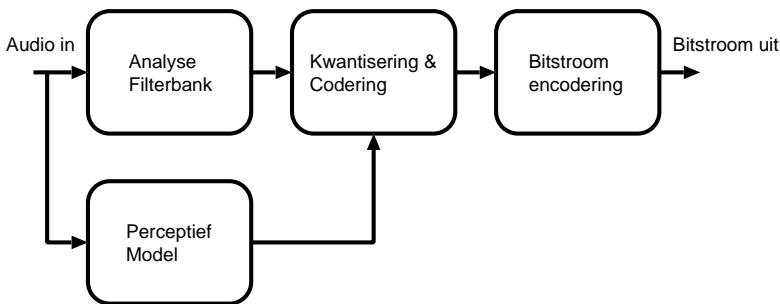
MPEG-2-codering geeft de mogelijkheid tot het gebruik van lage bemonsteringsfrequenties en introduceert het coderen van meerkanaalsgeluid; de standaardisatie was rond in 1994 en is gepubliceerd in 1995 (ISO/IEC 13818-3).

Voorbeelden van toepassingen zijn:

- Digitale radio, bijvoorbeeld Digital Audio Broadcasting (DAB),
- Geluid bij digitale TV, bijvoorbeeld Digital Video Broadcast (DVB),
- Opslag op cassette, bijvoorbeeld Digital Compact Cassette (DCC),
- Opslag op (magneto-)optische media zoals Minidisc en Video-CD, Digital Versatile Disc (DVD),
- Internet Audio, ISDN links.

Het basisidee achter hoge kwaliteit audiocodering is het uitbuiten van de maskerende werking door signalen die optreedt bij waarneming met het menselijk oor. Aan maskering is veel fundamenteel werk verricht door A.J.M. Houtsma en Armin Kohlraush.

Het blokschema van een audiocodeerinrichting ziet eruit als getekend in figuur 1.



Figuur 1: Blokschema van een audiocodeerinrichting. Block diagram of an audio encoder.

- Een filterbank wordt gebruikt om het ingangssignaal in (smalle) frequentiebandjes op te delen,
- Elk frequentiebandje wordt afzonderlijk gecodeerd, gebruikmakend van regels uit de psychoakoestiek,
- De afzonderlijk gecodeerde bandjes worden samengenomen en voorzien van extra informatie om het decoderen mogelijk te maken.

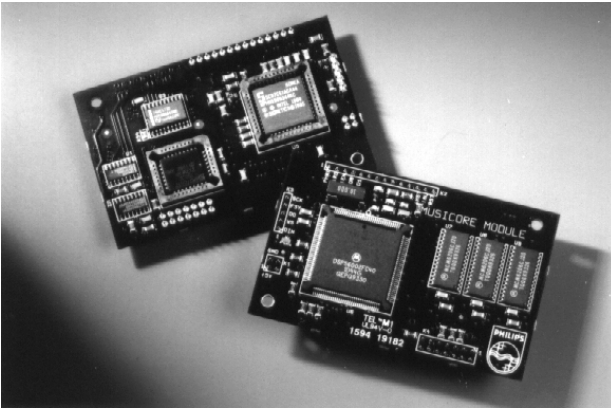
Voor het comprimeren van de geluidssignalen gebruikt MPEG een techniek die perceptuele ‘*subband coding*’ heet. Deze benut een psycho-akoestisch verschijnsel dat bekend staat als maskering. Dit is het effect dat een toon (of ruis) niet wordt waargenomen wanneer de frequentie ervan dicht ligt bij een andere toon die luider is, veel werk is hieraan verricht door o.a. Leon van de Kerkhof en Raymond Veldhuis.

Binnen de MPEG-codering zijn drie lagen mogelijk om verschillen in complexiteit van de decoder en efficiency van het systeem te krijgen. ‘Layer-I’ is de een-



Figuur 2: De SAA2500 van Philips die MPEG-1 Layer I en II decodeert (1993). The SAA2500 of Philips which decodes MPEG-1 Layer I en II (1993).

voudigste en is bestemd voor toepassingen waar men ook een eenvoudige coder wil hebben. ‘Layer-II’ vereist een complexere coder dan Layer-I en ook een enigszins complexere decoder. ‘Layer-III’ is nog complexer en bevat alle compressietechnieken die bekend waren ten tijde van de MPEG standaardisatie. Sinds eind jaren negentig is MPEG-1 Layer-III, ook wel MP3 genoemd, erg populair geworden om audio via het Internet te versturen en te ontvangen (het zogenaamde *downloaden*).



Figuur 3: De MUSICORE-module van Philips, gezien van twee zijden. Dit is de eerste generieke MPEG-encoder. MPEG-1 Layer-I en -II codering/decodering inclusief de MPEG-2-uitbreiding naar lagere bemonsteringsfrequenties, en G.722. De grootte is exact gelijk aan een creditcard. The MUSICORE-module of Philips, seen from two sides. This is the first generic MPEG-encoder. MPEG-1 Layer-I and -II coding/decoding including the MPEG-2- extension to lower sampling frequencies and G.722. The size is equal to a credit card.

Bij het manipuleren (*‘matrixing’*) van gecompriemde signalen zoals MPEG kan er hoorbare distorsie optreden (het zogenaamde *‘on-maskeren’*). Warner ten Kate heeft hiervoor een theorie opgesteld en ook praktische oplossingen gegeven. Zo geeft MPEG-2 een compatibele 5.1-kanaals uitbreiding naar twee kanalen voor MPEG-1, zonder dat er vervorming optreedt.

Digital Audio Broadcasting

Een toepassing van MPEG-1 Layer-II is Digital Audio Broadcasting (DAB). Ook hier zijn belangrijke Nederlandse bijdrages geleverd. In 1990 zijn Philips en de NOZEMA experimenten gaan doen. In april 1992 werd het ‘Nederlands DAB Overleg’ gestart om de DAB-activiteiten te coördineren. Een radio-ontvanger voor DAB-signalen is complexer dan een gemiddelde FM-ontvanger. Daar staan echter een groot aantal voordelen tegenover zoals audio-ontvangst van CD-kwaliteit onder vrijwel alle omstandigheden, groter bedieningsgemak en uitgebreide mogelijkheden voor extra diensten. Een groot voordeel van DAB is dat ook met mobiele ontvangers audio van goede kwaliteit gewaarborgd is. Een remedie tegen de negatieve effecten van de zgn. *‘Rayleigh fading’* op de ontvangst is het gebruik van een ingenieus transmissiesysteem: *‘Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex’* (COFDM). De vele tests en demonstraties hebben aangetoond dat het DAB-systeem mobiele ontvangst van zeer hoge kwaliteit mogelijk maakt.

Verborgene datakanaal voor digitale audio

Geïnspireerd door de toepassing van maskering van kwantiseringsruis in audiocompressie, kwam Erik Druyvesteyn tot het idee dat er behalve kwantiseringsruis nog meer

te maskeren zou kunnen zijn, misschien zelfs een heel ander kanaal. Dit idee werd door Raymond Veldhuis e.a. van de benodigde signaalbewerkingstheorie voorzien en leidde voor hen tot een Amerikaans octrooi. Het idee werd verder uitgewerkt en beproefd door Warner ten Kate. Memorabele demonstraties werden gegeven rond 1989, waarbij Scheherazade van Rimsky-Korsakov op fortissimo orkeststerkte in zijn geheel gemaskeerd (verborgen) kon worden door het Forellenkwintet van Schubert. De benodigde signaalbewerking werd uitgevoerd door de frequentieband op te splitsen in afzonderlijke bandjes ('subbands') zoals we ook van MPEG-audio kennen.

Het idee van een verborgen kanaal heeft een andere invulling gekregen door Werner Oomen e.a., die het signaal niet opsplijste in frequentiebandjes maar over de gehele audioband bewerkte; dit gecombineerd met een *dither*-signaal.

Stereobasisverbreding

Sinds de eerste stereofonische demonstratie op de wereldtentoonstelling in Parijs in 1881 zijn er veel verbeteringen gesuggereerd. Een pionier in Nederland was Kees de Boer. Hij heeft in de vooroorlogse jaren al gewerkt aan stereofonische geluidswaergave en is op dit onderwerp in 1940 gepromoveerd. De Boer experimenteerde met kunsthoofden gemaakt van gipsenafgietsels van zijn eigen hoofd, zie figuur 4.

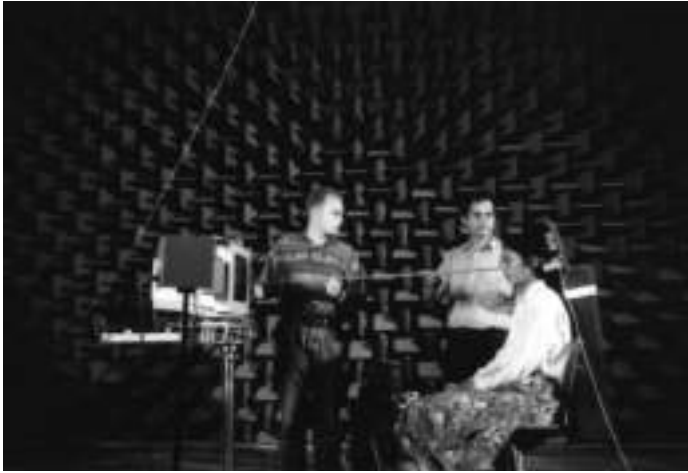


Figuur 4: Een gipsen afdruk van de Boer's hoofd, uit de beginperiode (ca. 1939) van de stereofonie en bedoeld als experimenteel kunsthoofd.

A plaster mask of De Boer, stemming from the beginning of stereophony (ca. 1939), used as an artificial head.

Een anekdote uit die tijd is dat De Boer iemand naar een warenhuis stuurde om een etalagepop te kopen. Hij wilde met het hoofd en de torso gaan experimenteren. Een ijverige politiemann probeerde daar echter een stokje voor te steken toen de 'naakte pop' over straat vervoerd werd. Dat was onwettig in die tijd. De vervoerder heeft toen maar zijn eigen jas uitgedaan en de pop hiermee aangekleed.

Een octrooi van De Boer uit 1943 gaat over goede stereowaergave als de luidsprekers dicht bij elkaar moeten staan. De wens om uit een compacte opstelling (zoals bij een TV, een mini-audiooestel of een draagbaar audiooestel) een goede stereowaergave te krijgen is dus niet nieuw maar nog steeds actueel. De auteur van dit artikel heeft onderzoek gedaan om langs elektronische weg een stereobasisverbreding te krijgen. Door de overdrachtsfunctie van het geluid vanaf een luidspreker naar de oren te meten kan men de benodigde filters bepalen. Deze filters zijn met eenvoudige analoge elektronica te maken (digitaal kan natuurlijk ook) en zijn commercieel bekend onder de naam 'Incredible Sound' en 'Incredible Surround'.



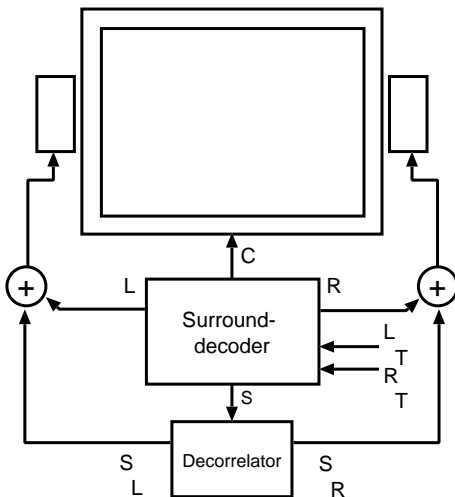
Op de foto in figuur 5 is te zien hoe deze meting verloopt.

Figuur 5: Het meten van hoofdgerelateerde overdrachtsfuncties ('HRTF') in de dode kamer van het Philips NatLab (1995). Van links naar rechts: Robert Toonen Dekkers, de auteur en Haiyan He (Foto Philips Research/R. v.d. Bergh).

The measurement of Head Related Transfer Functions in the anechoic room of Philips' Research Lab. (1995). From left to right: Robert Toonen Dek-

kers, Ronald Aarts and Haiyan He. (Photo Philips Research/R. v.d. Bergh).

Surround-weergave via twee luidsprekers



Figuur 6: Blokschema van een systeem voor Surround weergave via slechts twee luidsprekers links en rechts naast de TV. Block diagram of a system for Surround sound reproduction ('3D Surround') via two loudspeakers only. They are attached to the left and right side of the TV-set.

Gebaseerd op de resultaten van het onderzoek van de stereobasisverbreding is door ondergetekende een systeem bedacht dat het mogelijk maakt om meerkanaalsgeluid weer te geven via slechts twee luidsprekers. Figuur 6 toont het blokschema hiervan, het systeem staat commercieel bekend als '3D Surround'.

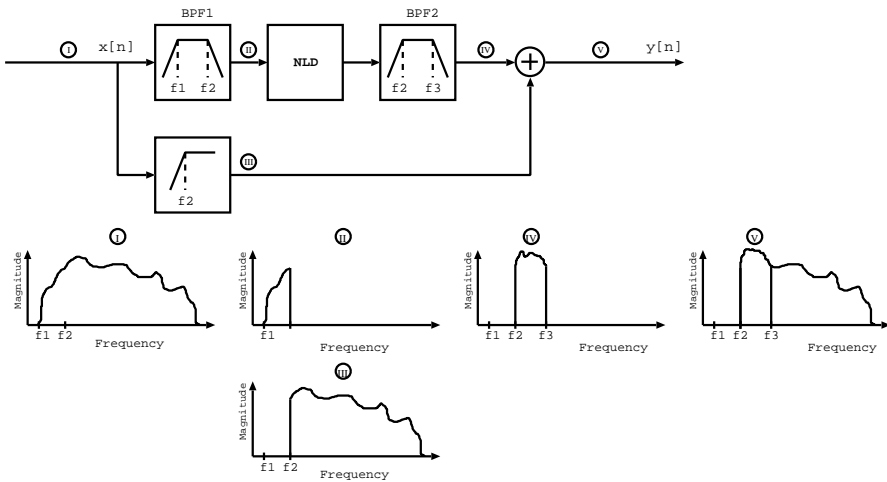
Een surround-decoder vertaalt de verzonden signalen naar L, R, S en C, waarna het Surround-kanaal wordt bewerkt en opgeteld bij de gewone links (L) en rechts (R) signalen. De luisteraar heeft dan de illusie naar een heuse surround-opstelling te luisteren.

Ultra Bass

Sinds de uitvinding van de elektrodynamische luidspreker omstreeks 1925 is er altijd de behoefte geweest aan meer akoestisch vermogen, speciaal bij lage frequenties. Terwijl de eis voor een hogere basresponsie blijft, komt er door miniaturisatie van audio toestellen, schootcomputers ('laptops') e.d. een steeds grotere wens naar kleinere luidsprekers. In plaats van de luidspreker te veranderen is er

een nieuwe methode ontwikkeld om toch een redelijke basillusie op te wekken. Deze auteur kwam op het idee om de methode van de ontbrekende grondgolf (*missing fund-*

amental, residue pitch, virtual pitch) te gebruiken. De waarneming van het effect van de ontbrekende grondgolf gaat terug tot Ohm en Helmholtz, maar vooral in Eindhoven is er veel fundamenteel werk aan verricht, in het bijzonder door Jan Schouten, de oprichter van het IPO. De basweergave-methode die gebruik maakt van dit werk is begin 1999 op de markt gekomen onder de naam ‘Ultra Bass’.



Figuur 7: Blokschema van ‘Ultra Bass’.
Block diagram of ‘Ultra Bass’.

Figuur 7 laat het blokschema van ‘Ultra Bass’ zien. Het frequentiegebied $f1-f2$ dat door de (te kleine) luidspreker niet kan worden weergegeven, wordt uit het ingangssignaal gefilterd door een banddoorlaatfilter BPF1. Dit signaal wordt door een niet-lineair element naar hogere frequenties getransformeerd die de (kleine) luidspreker wel kan weergeven.

Tot slot

Het bovenstaande is slechts een kwart eeuw signaalbewerking voor geluidswaergave in vogelvlucht. Een serieuze geschiedschrijving zou een heel boek vullen. Er is de afgelopen 25 jaar zeer veel gebeurd, wat ons zo achterom kijkend alleen nog maar nieuwsgieriger kan maken naar wat ons de volgende 25 jaar zal brengen.

Bronnen:

Philips Technisch Tijdschrift, **42**, Okt. 1985; Widescreen Review Juni 1994; IEEE Signal Processing magazine, **14** (5) Sept. 1997, JAES **45** (1/2) Jan/Feb 1997, Digitale/Analoge Technologie April 1993, Elektronica 26 Aug. 1994, JAES **44** (12) p.1104 Dec. 1996.