

Een FM-klokkensynthese t.b.v. een beiaardstudieklavier

Frequentiemodulatie-synthese (FM)

De Amerikaanse componist John Chowning ontdekte dat frequentiemodulatie eveneens kon worden toegepast als methode voor klankopwekking. In plaats van een hoge frequentie te moduleren met een laagfrequent audiosignaal, zoals in de radiotechniek, ging Chowning uit van twee audiosignalen: één als draaggolf, carrier (c) genaamd, en één als modulator (m). De carrieroscillator wordt zo cyclisch geleidelijk evenveel omhoog en omlaag gemoduleerd door de modulatoroscillator.

Als deze modulatie langzaam gebeurt horen we dat als een sirene of vibrato, afhankelijk van de snelheid en diepte van die modulatie. Echter modulaties sneller dan 20 maal per seconde kunnen we niet meer als zodanig waarnemen. We ervaren deze frequentiemodulatie nu als een nieuw gevormde klank. Opmerkelijk in de toepassing van frequentiemodulatie voor klankopwekking is dat veelal de modulatiefrequentie juist hoger is dan de carrier- of draaggolffrequentie. Chowning paste zo een al oud gekend principe toe voor een geheel nieuwe toepassing: klankvorming.

“1 ‘+’ 1 = veel”

In dit FM-model produceren beide oscillatoren een zogenoemde pure toon, een sinusgolvorm, één enkele frequentie. Volgens de wiskundige theorie van Fourier kan evenwel worden aangetoond dat we nu een resulterende complexe trilling hebben verkregen die bestaat uit een veelvoud van frequenties: grondtoon met boventonen. Hierin schuilt dan ook de kracht en de elegantie van het FM-model. Uitgaande van slechts twee frequenties, sinustrillingen, wordt een nieuwe complexe trilling opgewekt die echter kan bestaan uit een optelsom van vele nieuw gevormde sinustrillingen, ontstaan door het frequentiemodulatie-principe.

Timbre: de dynamiek van grondtoon en boventonen

Elke klank kan worden ontleend in een veelvoud van sinusvormige trillingen, met bijbehorende frequentie, amplitude en fase (die van veel minder belang is). De trilling met de laagste frequentie wordt grondtoon, eerste harmonische, of fundamental genoemd, de hogere frequenties worden aangeduid als boventonen, partialen of harmonischen. Harmonischen noemt men die boventonen die een heel veelvoud betreffen van de laagste frequentie, de grondtoon. Deeltonen die geen heel veelvoud zijn van de fundamental worden aangeduid als partialen of inharmonische frequenties.

Het toonhoogte-interval tussen carrier en modulator bepaalt: welke boventonen

Ofwel in muziektermen: door het interval tussen de carrier en modulator. Deze toonsafstand bepaalt welke boventonen er kunnen worden gevormd.

De hoeveelheid frequentiemodulatie bepaalt: hoeveel boventonen

Deze wordt geregeld door de grootte van de de trillingsuitslag van de modulator. Anders gezegd door de amplitude, het uitgangsvolume van de modulator. Globaal gesteld neemt de sterkte van de gevormde partialen stijgend in de reeks af.

Dynamiek: oscillator plus envelope generator

Elke oscillator, zowel carrier als modulator is voorzien van een zogenoemde envelope generator, een omhullende vormer in het Nederlands, waarmee de dynamiek wordt geregeld. Het output level, de trillingsgrootte, de amplitude kan zo van elke oscillator geheel onafhankelijk worden geregeld.

Ook kan het output level worden beïnvloed door de aanslagsterkte van een toets op een klavier. De envelope generator van de carrier bepaalt zo het eigenlijk hoorbare

signaal, het uiteindelijke luidheidsverloop. De modulator omhullende regelt het klankkleurverloop, ofwel het timbre. De tijdsduur van deze beide omhullenden kan worden geschaald aan de hand van de toonhoogte, welke toets op het klavier. Het belang van deze envelopes kan nauwelijks worden overschat. Samen met het spectrum, welke boventonen, zijn ze heel bepalend voor de uiteindelijke klankidentiteit.

De vorming van de boventonen

Het principe is eenvoudig: behalve de carrierfrequentie zelf verschijnen er nieuwe frequenties gevormd de *som* van carrier- en modulatorfrequentie. Op dezelfde wijze worden er eveneens nieuwe frequenties opgewekt op basis van het *verschil* van carrier- en modulatorfrequentie.

Zijbanden

Deze nieuw te vormen frequenties worden in FM-jargon *zijbanden* genoemd, Twee aan twee wordt er zo een zijbandpaar gevormd. De amplitude van de modulator bepaalt hoeveel van die zijbandparen worden opgewekt. De extra frequenties die ontstaan op basis van de somfrequentie worden aangeduid benoemd als bovenzijbanden. De extra opgewekte frequenties op basis van de verschilfrequentie worden aangeduid als onderzijbanden.

De bovenzijbandfrequenties

Als volgt verkrijgen we de bovenzijbanden. We nemen het carriergetal en tellen er het modulatorgetal bij op, Vervolgens tellen we bij die uitkomst weer het modulatorgetal op. Dan weer een keer, nog een maal, enzovoorts; dit afhankelijk van het modulator output level. Voor een c:m verhouding van 2:7 als in de 'Tubular Bell' preset in de DX7 levert dit frequenties met de volgende verhoudingsgetallen op:

$$(2+7)= 9, (9+7)= 16, (16+7)= 23, (23+7)= 30$$

De onderzijbandfrequenties

Op overeenkomstige wijze vinden we de onderzijbanden.

Eerst trekken we van het carriergetal het modulatorgetal af. Als uitkomst voor de verschilfrequentie verkrijgen we nu -5. Vervolgens verwaarlozen we het minteken. Daarna herhalen we dezelfde werkwijze als bij de berekening van de bovenzijbanden. We verkrijgen dan de volgende frequenties:

$$(|2-7|)= 5, (5+7)= 12, (12+7)= 19, (19+7)= 26$$

Opmerkelijk is verder dat de modulatorfrequentie zelf in de gevormde klank ontbreekt, evenals alle veelvouden ervan.

Vervolgens alle frequentieverhoudingsgetallen op volgorde, we verkrijgen dan het volgende boventoonspectrum:

2 5 9 12 16 19 26 30

De laagste frequentie '2' vormt voor onze waarneming de referentie, of anders gezegd: die ervaren we als grondtoon. Dit wordt door onze perceptie geïnterpreteerd als een '1'. Daarom alles nog eens door 2 delen. Dan krijgen we op volgorde gezet het resulterende spectrum:

1 2.5 4.5 6 8 9.5 13 15

Afgerond op onze evenredigzwevende stemming komt dat overeen met de volgende relatieve toonreeks op c1:

c1 e2 d3 g3 c4 d#4 a4 b4

Een spectrum met duidelijk een mengsel van enerzijds harmonische deeltonen, de hele getallen, en anderzijds de inharmonische deelfrequenties, de tonen met decimale getallen. Vanuit de psycho-akoestiek weten we dat een samenklank van harmonische boventonen tendeert naar 'versmelting' tot een ondeelbare klank met éénduidige toonhoogte.

Echter, de versmeltingsgraad neemt toe naarmate de verhoudingsgetallen van de samenstellende frequenties klein zijn en ze een aaneengesloten reeks vormen. In dit voorbeeld zullen de harmonischen in het spectrum, 1, 6, 8, 13 en 15 niet echt versmelten tot een ondeelbare klank vanwege het ontbreken van de lagere harmonischen aan de ene kant en, aan de andere kant, door de grote verhoudingsgetallen voor de hogere boventonen. Ook het gegeven dat ze geen aaneengesloten reeks vormen draagt hier toe bij.

Kortom het totaal levert een onmiskenbaar klokachtige klank op met kenmerken van versmelting: een duidelijke ondubbelzinnige toonhoogte-indruk. Maar ook met kenmerken van 'splitsing': naast die eenduidige toonhoogte-ervaring, horen we ook nog meerdere min of meer zelfstandige tonen met daarin één die duidelijk opvalt. Dat is in dit geval de eerste boventoon (2.5), die een grote deciem boven slagtoon.

Klankkenmerken van een klok

De slagtoon

Een belangrijk waarnemingsaspect van een beiaardklok is de zogenoemde slagtoon. Dat is de metaalachtige klank op het moment van de aanslag die de toonhoogte-indruk bepaalt. Opmerkelijk genoeg hoeft deze toonhoogtesensatie niet noodzakelijkerwijs overeen te komen met een van de deeltonen of de grondtoon.

Het betreft een psycho-akoestisch verschijnsel. Als we tegelijkertijd zuivere tonen, sinustonen, horen met eenvoudige, of bij benadering, harmonische frequentierelatie, zal onze waarneming een toonhoogte-gewaarwording ondervinden op de grootse gemene deler van deze verhoudingen. (Dit verschijnsel wordt residutoonhoogte genoemd, of ook wel 'missing fundamental'. Het is in 1939 ontdekt door de Nederlandse biofysicus Jan Schouten.) Op het moment van aanslag zien we dat het octaaf, de duodeciem en het trippeloctaf sterk klinken, die vormen een frequentierelatie van 2 : 3 : 4. De toonhoogte die we nu ervaren is de (virtuele) 1. Dit is de toonhoogte waarop we de klok benoemen, de slagtoon. De grondtoon ligt echter een octaaf lager.

Het boventoonspectrum

In de tabel 'Klankanalyse van een beiaardklok' zien we de samenstellende partialen van 1 tot en met 40. Een aantal klokkenpartialen hebben in de klokkenwereld vaste namen gekregen, ook deze zijn in de tabel opgenomen. Daarnaast zien we de aanvangsterkte bij de aanslag en geeft de rechter kolom een indruk van de relatieve uitklinktijden.

De sterkste boventonen zijn vetgedrukt, wat uiteraard al doet vermoeden, dat deze ook het belangrijkste zijn voor de klankidentiteit.

Als we op grote afstand zo'n klok horen is het nog steeds onmiskenbaar een klok, terwijl slechts de allersterkste deelfrequenties worden gehoord, de andere worden niet waargenomen omdat ze zich vanwege de grote luisterafstand, onder de gehoordrempel bevinden.

De luidste frequenties in het klokspectrum

(Naar André Lehr uit: 'Leerboek der campanologie')

Respectievelijk het frequentieverhoudingsgetal (geïdealiseerd afgerond), de partiaalnaam, de toonhoogte (met weglating van de afwijking in cents), de aanvangsterkte en uitklinktijd.

Ratio	Partiaalnaam	Toonhoogte	Aanvangssterkte	Uitklinktijd in %
1	grondtoon	c1	mf	100
2	priem	c2	f	55
2.38	kleine terts	eb2	f	75
4	octaaf	c3	fff	30
6	duodeciem	g3	ff	20
8	dubbeloctaaf	c4	f	15
11	undeciem	f4	mf	10
13	onbenoemd	a4	mp	7.5
16	tripeloctaaf	c5	mp	5

Piet van Egmond maakte al in de zestigerjaren van de vorige eeuw klokkenimitaties op het orgel. In onderstaande tabel zien we dat hij daarvoor slechts vier orgelregisters benutte, twee zeer boventoonarme registers, wijde open labialen voor grondtoon en kleine deciem, en twee boventoonrijke registers, prestanten voor het octaaf en de duodeciem. Tezamen met de nagalm in de kerk en de speelwijze: grondtoon en kleine deciem aangehouden en voorzien van tremulant en de prestanten ritmisch gespeeld als 'bim-bam' leverde dat, zeker in die tijd, spectaculaire resultaten op.

De combinatie van registers die Piet van Egmond gebruikte als klokkenimitatie op het orgel (naar eigen auditieve analyse)

grondtoon	c1	wijde open labiaal
kleine terts	eb2	wijde open labiaal
octaaf	c3	prestant
duodeciem	g3	prestant

De abstractie van Van Egmond benadrukt nog eens het zo kenmerkende aspect van de kleine terts in de klank.

Een eenvoudige FM-kloksynthese

Een eenvoudige oplossing voor een FM-kloksimulatie bestaat uit vier oscillatoren: twee maal een paar: carrier en modulator. De beide carrier outputs worden eenvoudig in de gewenste verhouding bij elkaar gemend. Eén paar met c : m verhouding 1:3 en een ander stel met c:m verhouding 2.38:8.38. (Als we deze laatste verhouding vereenvoudigen, staat er dus eigenlijk 1:3.52. Dat lijkt erg veel op de c:m verhouding 1:3.5 (vereenvoudiging van 2:7) zoals we die al tegenkwamen in de DX7 preset 'Tubular Bell'. Beide spectra vertonen dan ook een grote mate van overeenkomst, echter het spectrum gevormd door de c:m verhouding 2.38:8.38 ligt in z'n geheel een kleine deciem (1:2.38) hoger dan het spectrum gevormd door c : m verhouding 1:3.

De zijbandfrequenties die worden gevormd door een FM-paar met een c:m verhouding 1:3

Ratio	Offset: halve tonen.cents	Nootnaam.cents	Naam klokpartiaal
1	0	c1	grondtoon
2	12	c2	priem
4	24	c3	octaaf
5	27.86	e3 -14	grote deciem
7	33.69	a#3-31	
8	36	c4	dubbeloctaaf
10	39.86	e4 -14	
11	41.51	f#4-49	
13	44.40	a4 +40	onbenoemd
14	45.69	a#4-31	
16	48	c5	tripeloctaaf
17	49.05	c#5 +5	
19	51	d#5	
20	51.86	e5 -14	
22	53.51	f#5-49	

Het paar met de verhouding 2.38:8.38 resulteert in de volgende twee laagste deelfrequenties: de carrier zelf, 2.38 en de eerste verschilfrequentie, 6. Partiaal 2.38 is nu de kleine deciem in het spectrum. In klokkentermen de kleine terts genoemd omdat deze een kleine terts boven de slagtoon, de virtuele '1' ligt. (Idealiter valt de toonhoogte van de slagtoon samen met die van de priem.) Bovendien met verhoudingsgetal 6 is de duodeciem in de klokkenklank. In onderstaande tabel vind je eveneens de overig gevormde deelfrequenties.

De zijbandfrequenties die worden gevormd door een FM-paar met een c:m verhouding 2.38:8.38

Ratio	Offset: halve tonen.cents	Nootnaam.cents	Naam klokpartiaal
2.38	15	d#2	kleine terts
6	31.02	g3 +2	duodeciem
10.76	41.13	f4 +13	dubbelundeciem
14.38	46.15	a#4+15	
19.14	51.10	d#5+10	
22.76	54.10	f#5+10	
27.52	57.39	a5 +39	
31.14	59.53	c6 -4	
35.90	62	d7	
39.52	63.65	e7 -35	

De combinatie van deze twee bovenstaande spectra levert een totaalklank op die een grote mate van overeenkomst vertoont met de klank van een fysieke beiaardklok. De kwint ontbreekt weliswaar, maar dat is echter niet zo opvallend vanwege de bescheiden luidsterkte mp. En in plaats van een b3 zien we een ais3 in het spectrum.

De twee spectra gecombineerd (de 4-oscillatoren FM-kloksimulatie)

Ratio	Offset: halve tonen.cents	Nootnaam.cents	Naam klokpartiaal
1	0	c1	grondtoon
2	12	c2	priem
2.38	15	d#2	kleine terts
4	24	c3	octaaf
5	27.86	e3-14	grote deciem
6	31.02	g3 +2	duodeciem
7	33.69	a#3-31	
8	36	c4	dubbeloctaaf
10	39.86	e4 -14	
10.76	41.13	f4 +13	dubbelundeciem
11	39.51	f#4-49	
13	44.40	a4 +40	onbenoemd
14	45.69	a#4-31	
14.38	46.15	a#4+15	
16	48	c5	tripeloctaaf
17	49.05	c#5 +5	
19	51	d#5	
19.14	51.10	d#5+10	
20	51.86	e5 -14	
22	53.51	f#5-49	
22.76	54.10	f#5+10	
27.52	57.39	a5 +39	
31.14	59.53	c6 -4	
35.90	62	d7	
39.52	63.65	e7 -35	

Een overtuigender simulatie (zoals in het Vlaardingse studieklavier) kan worden verkregen door uitbreiding met nog een extra FM-paar carrier en modulator met een c:m verhouding als 2:6. Dat resulteert in een frequentiespectrum dat een octaaf hoger ligt dan het spectrum gevormd door c:m = 1:3. Deels resulteert dat in dezelfde partiaalfrequenties, die elkaar overlappen en zo worden benadrukt (groen gemarkeerd).

De zijbandfrequenties die worden gevormd door een FM-paar met een c:m verhouding 2:6

Ratio	offset: halve tonen.cents t.o.v. de grondtoon	nootnaam (+/- cent)	naam klokpartiaal
2	12	c2	octaaf
4	24	c3	dubbeloctaaf
8	36	c4	tripeloctaaf
10	39.96	e4 -14	
14	45.69	a#4-31	
16	48	c5	quadrupeloctaaf
20	51.86	e5 -14	
22	53.51	f#5-49	
26	56.40	a5 +40	
28	57.69	a#5-31	
32	48	c5	
34	61.05	c#6 +5	
38	63	d#6	
40	63.86	e6 -14	
44	65.51	f#6-49	

De drie spectra gecombineerd (de 6-oscillatoren FM-kloksimulatie)

Ratio	offset: halve tonen.cents	nootnaam.cents	naam klokpartiaal
1	0	c1	grondtoon
2	12	c2	priem
2.38	15	d#2	kleine terts
4	24	c3	octaaf
5	27.86	e3 -14	grote deciem
6	31.02	g3 +2	duodeciem
7	33.69	a#3-31	
8	36	c4	dubbeloctaaf
10	39.86	e4 -14	
10.76	41.13	f4 +13	dubbelundeciem
11	39.51	f#4-49	
13	44.40	a4 +40	onbenoemd
14	45.69	a#4-31	
14.38	46.15	a#4+15	
16	48	c5	tripeloctaaf
17	49.05	c#5 +5	
19	51	d#5	
19.14	51.10	d#5+10	
20	51.86	e5 -14	
22	53.51	f#5-49	
22.76	54.10	f#5+10	
26	56.40	a5 +40	
27.52	57.39	a5 +39	
28	57.69	a#5-31	
31.14	59.53	c6 -4	
32	60	c5	
34	61.05	c#6 +5	
35.90	62	d7	
38	63	d#6	
39.52	63.65	e7 -35	
40	63.86	e6 -14	
44	65.51	f#6-49	

Ter vergelijking een klankanalyse van een fysieke beiaardklok

partiaal nr.		toonhoogte.cents	sterkte	uitklinktijd %
1	grondtoon	c1 +31	mf	100
2	priem	c2 +31	f	55
3	kleine terts	d#2+40	ff	75
4	kwint	g2 +23	mp	20
5	octaaf	c3 +31	fff	30
6	grote deciem	e3 +58	p	
7	1e undeciem	f3 -34	p	
8	2e undeciem	f3 -14	p	
9	duodeciem	g3 +9	ff	20
10		a3 +2	pp	
11		b3 +32	pp	
12	dubbeloctaaf	c4 +91	f	15
13		c#4+13		
14		c#4+22		
15		d4 +45		
16		d#4+29		
17		e4 +60		
18	dubbelundeciem	f4 +56	mf	10
19		f#4+57		
20		f#4+64		
21		g4 +11		
22		g4 +31		
23		gis4+65		
24		a4 +18		
25		a4 +46	mp	7.5
26		a#4-7		
27		a#4+16		
28		a#4+36		
29		b4 -6		
30		b4 +53		
31		c5 -30		
32		c5 -11		
33		c5 +17		
34	tripeloctaaf	c5 +82	mp	5
35		c#5+12		
36		c#5+37		
37		c#5+58		
38		c#5+60		
39		d5 -4		
40		d5 +29		

Naar André Lehr uit: 'Leerboek der campanologie'

(De analyse was gebaseerd op een klok met grondtoon gis +31. Voor het gemak, ter vergelijking met de andere tabellen, heb ik het hele spectrum omhoog getransponeerd naar grondtoon c1)

Het Vlaardingse beiaardstudieklavier

De beiaardkloksynthese voor het Vlaardingse studieklavier behelst de variant met 6 oscillatoren. Afgerond met een simulatie van omgevingsakoestiek tezamen gerealiseerd met het FM-syntheseprogramma FM8 van Native Instruments. Al met al een studieklavier dat voorziet in een 64-voudige polyfonie. Dat wil zeggen dat er maximaal 64 klokkensimulaties tegelijkertijd kunnen klinken. Behalve een kleine tertsklokvariant beschikt het studieklavier ook over extra klanken als: grote tertsklok, metallofoon, buisklokken en harmonische klok. Deze laatste synthese betreft een kloksimulatie zonder de kenmerkende terts boventoon. Dat biedt de mogelijkheid tot vergelijking en evaluatie van de rol van de terts in de klokkenklank m.b.t. speelpraktijk, compositie en bewerking.

bronnen

'Leerboek der campanologie',
André Lehr,
Nationaal Beiaardmuseum, Asten, 1976

CAMPANOLOGIE,
dr André Lehr,

Koninklijke Beiaardschool "Jef Denijn" Mechelen, België, 1996 ISBN 90-75832-01-X

André Lehr

<http://www.beiaarden.nl/index.php/campanoloog-andre-lehr>

The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation

John M. Chowning

https://ccrma.stanford.edu/sites/default/files/user/jc/fm_synthesispaper-2.pdf

FM Theory & Applications

By Musicians for Musicians

Dr. John Chowning and David Bristow

1986 Tokyo

Yamaha Music Foundation

ISBN 4-636-17482-8 COO73

www.ernstbonis.nl

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Frequentie>

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Frequentiespectrum>

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Cent_\(muziek\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Cent_(muziek))

https://nl.wikipedia.org/wiki/Harmonische_boventoonreeks

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Inharmoniciteit>