II simple FM, enkele experimenten met de DX7 en beknopte theorie

Een snel en gemakkelijk rekenkunstje

experiment 1

We kiezen het simple FM-algoritme (op de DX7 d.m.v. 'Voice Initialize') en stellen de carrierfrequentie in op Ratio 2 en de modulatorfrequentie op Ratio 7.

Het modulator output level stellen we in op 75.

Als we nu de waarde van het modulator output level veranderen horen we hoe dit smenhangt met de hoeveelheid boventonen in de gevormde klank.

regel 1, de hoeveelheid boventonen (zijbanden)

Het modulator output level, de *modulatiediepte* ofwel de maximale afwijking van de carrierfrequentie bepaalt *hoeveel* boventonen er worden gevormd.

experiment 2

Nu wijzigen we het modulatorfrequentie-getal van 7 naar 6 en bemerken hoe drastisch dit het klankkarakter beïnvloedt.

regel 2, welke boventonen (zijbanden), welke klank

Het mogelijk te vormen boventoonspectrum wordt bepaald door ***verhouding tussen carrier- en modulatorfequentie***.

de boventonen van uit een gegeven c : m-verhouding

Als we snel en alleen willen weten welke zijbandfrequenties er worden gevormd, met verwaarlozing van hun faseteken.

experiment 3

We kiezen weer het simple FM algoritme uit experiment 1 met c : m-verhouding = 2 : 7 en modulator output level 75 (DX7).

Bij dit output level van 75 worden er vier zijbandparen gevormd (zie appendix).
Het spectrum bestaat nu uit:

1) de carrierfrequentie zelf, de toonhoogte van de toets die we indrukken,

2) de boven- en onderzijbanden:

Met het volgende 'kunstje' verkrijgen we de bovenzijbanden.
We nemen het carrierverhoudingsgetal en tellen er het modulatorgetal bij op.
Vervolgens stellen we bij die uitkomst weer het modulatorgetal op.
Dan weer een keer, nog een maal, enzovoorts
Dit levert de volgende bovenzijbanden op:

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

Op overeenkomstige wijze vinden we de onderzijbanden.
Eerst trekken we van het carriergetal het modulatorgetal af.
Als uitkomst verkrijgen we nu -5. Vervolgens verwaarlozen we het minteken. Daarna herhalen we de ‘opteltruc’ zoals bij de berekning van de bovenzijbanden
We verkrijgen dan de volgende onderzijbanden:

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

Vervolgens alle frequentieverhoudingsgetallen op volgorde zetten:

2, 5, 9, 16, 19, 23, 26, 30

De laagste frequentie ‘2’ vormt voor onze waarneming de referentie, of anders gezegd de grondtoon. Zo’n grondtoon wordt door onze waarneming geïnterpreteerd als een ‘1’.
Daarom alles nog eens door 2 delen. Dan krijgen we:

1, *2.5*, *4.5*, 8, *9.5*, *11.5*, 13, 15

(Deze getallen geven dus direct de frequentieverhoudingen van de gevormde boventoonreeks weer.) Het resultaat is nu een klank die bestaat uit mengsel van harmonische boventonen, de hele getallen, en uit niet-harmonische boventonen, de getallen met decimalen (cursief).

experiment 4

We veranderen de carrierfrequentie opeenvolgend naar Ratio 5, 9, 16, 23, 26 en 30. We horen dan achtereenvolgens een zelfde soort spectrum, maar met geheel andere stekteverhoudingen tusen de gevormde boventonen.

regel 3, *verschillende c : m-verhoudingen kunnen boventonen genereren die behoren tot dezelfde categorie.*

Vanuit een gegeven c : m-verhouding kunnen we het carriergetal vervangen door elk ander getal uit de zijbandreeks. M.b.t. ons voorbeeld c : m = 2 : 7, kunnen we zodoende het carriergetal 2, vervangen door een keuze te maken uit de verhoudingsgetallen van de gevormde zijbandfrequenties: 5, 9, 16, 19, 23, 26, 30.

simple FM, wat precieser bekeken: in formules en enkele rekenvoorbeelden

De c : m-verhouding bepaalt welke boventonen, harmonischen, er kunnen worden gevormd, volgens de onderstaande formule.

$$| c \pm nm |$$

waarvoor geldt:
c: carrierfrequentie
m: modulatorfrequentie
n: getal uit de rij der gehele getallen 0, 1, 2, …

Volgens deze formule worden er som- en verschilfrequenties gevormd, zijbanden genaamd.

Hoeveel van die zijbanden er ontstaan wordt bepaald door I, de modulatie-index volgens onderstaande formule.

$$I = Dc : m$$

Dc: de maximale frequentie-afwijking in Hz van de carrierfrequentie, onder invloed van m, de `modulatiefrequentie.`

Volgens onderstaande vuistregel vinden we het aantal voor de waarneming relevante zijbandparen, n.

```
n = I + 2
```

Het lijkt allemaal wat moeilijker dan het in feite is. Laten we eens een concreet voorbeeld nemen en eens nagaan wat deze formules voor de praktijk betekenen.

Stel dat we het volgende uitgangspunt hebben.

```
     modulatorfrequentie,100 Hz
     aantal zijbanden, 4
     carrierfrequentie, 1000 Hz
```

Er ontstaan nu in het uitgangssignaal, behalve de carrierfrequentie ook nog som- en verschilfequenties van carrier- en modulatorfrequentie. De somfrequenties zijn de bovenzijbanden en de verschilfrequenties de onderzijbanden.

Het getal n geeft aan hoeveel er van die boven- en onderzijbanden relevant zijn voor de waarneming.

In het gaval van vier zijbanden betekent dat dus dat we vier keer alsvolgt de volgende sommen moeten maken.

```
c + 1m = 1000 + 100 = 1100
c + 2m = 1000 + 200 = 1200
c + 3m = 1000 + 300 = 1300
c + 4m = 1000 + 400 = 1400
```

Ook voor de onderzijbanden moeten we vier vergelijkbare sommen maken. Echter met dien verstande dat elke *oneven onderzijband* moet worden *vermenigvuldigd met -1*.

```
-(c - 1m) = -(1000 - 100) = -900
  c - 2m  =   1000 - 200  =  800
-(c - 3m) = -(1000 - 300) = -700
  c - 4m  =   1000 – 400  =  600
```

Alles netjes op volgorde gezet inclusief de carriefrequentie verkrijgen we dan het volgende rijtje:

```
1400 Hz
1300 Hz
```

```
1200 Hz
1100 Hz
1000 Hz
-900 Hz
 800 Hz
-700 Hz
 600 Hz
```

Met slechts twee sinusvormige signalen hebben we nu een klank gevormd die bestaat uit maar liefst negen deelfrequenties. Door het modulator output level te vergroten worden er uiteraard ook meer zijbanden gevormd. Het spectrum wordt dus dichter.

Nog eens een voorbeeld maar dan met carrier- en modulatorfrequenties verwisseld:

```
c =  100 Hz
m = 1000 Hz
n = 4
```

Door vervolgens weer de bekende formule | c ± nm | toe te passen vinden we dan de volgende uitkomsten.

```
c, de carrierfrequentie, 1000 Hz

de onderzijbandfrequenties
-(c – 1m) = -(100 – 1000) =   900
  c – 2m  =   100 – 2000  = -1900
-(c – 3m) = -(100 – 3000) =  2900
  c – 4m  =   100 – 4000  = -3900

de bovenzijbandfrequenties
  c + 1m  =   100 + 1000  =  1100
  c + 2m  =   100 + 2000  =  2100
  c + 3m  =   100 + 3000  =  3100
  c + 4m  =   100 + 4000  =  4100

onder- en bovenzijbandfrequenties op volgorde
```

900, 1100, *-1900*, 2100, *2900*, 3100, *-3900*, 4100

De opeenvolgende frequenties behoren om en om tot *onder*- en bovenzijband.

Bij de onderzijbanden zien we negatieve frequenties verschijnen. Dit betekent niets anders dan dat deze frequenties een faseverschuiving vertonen van 180 graden. In de meeste gevallen kunnen we het minteken verwaarlozen.

Intervallen, frequentieverhoudingen

Omdat wij echter geen absolute frequenties, toonhoogten herkennen, maar *intervallen*, ofwel *frequentieverhoudingen* is het veel eenvoudiger in de formule in plaats van frequentiegetallen, de getallen voor de frequentieverhouding in te vullen (bij de DX-synthesizers, in Ratio mode).
In de uitkomst van de formule voor het spectrum zien we dan direct de harmonischennummers.

Het volgende voorbeeld uit het DX7 operating manual c : m = 1 : 3 levert aldus het volgend spectrum op.

```
de carrier, grondtoon, eerste harmonische, 1

de onderzijband-harmonischen
-(c - 1m) = -(1 - 3) =   2
  c - 2m  =   1 - 6  =  -5
-(c – 3m) = -(1 - 9) =   8
  c – 4m  =   1 -12  = -11

de bovenzijband-harmonischen
  c + 1m  =   1 + 3  =   4
  c + 2m  =   1 + 6  =   7
  c + 3m  =   1 + 9  =  10
  c + 4m  =   1 +12  =  13
```

Hoe ver dit spectrum volgens de bekende formule zal worden gevormd hangt uiteraard weer af van de modulatie-index. In de praktijk van een DX-synthesizer wordt dat bepaald door het modulator output level.

Belangrijke conclusie uit onze experimeten is de het volgende.

Naarmate de modulatiediepte toeneemt, wordt de carrierfrequentie, globaal gezien, steeds zwakker en ontstaan er steeds meer zijbandfrequenties.

De energie wordt met het toenemen van de modulatie-diepte als het ware van de carrier weggehaald en verdeeld over de gevormde zijbandfrequenties.

De totale energie in het carriespectrum blijft echter gelijk.

Laten we gedurende de duur van een klank de modulatie-diepte veranderen door de enevelope generator van de modulator, dan verkrijgen we een sterkteverloop van de onderlinge deelfrequenties.

Men kan dit enigszins vergelijken met de werking van filters in subtractieve synthese.

Zo zou men, overeenkomstig, de c : m-verhouding kunnen vergelijken met de keuze van golfvorm in subtractieve synthese.

Echter met de bepaling van de c : m-verhouding hebben we een veel krachtiger gereedschap voor klankvorming ter beschikking dan met de subtractieve variant, oscillator en filter. Te meer nog daar we door een juiste keuze van de c : m-verhouding ook spectra kunnen generen met deeltonen waarvan de frequenties niet in een harmonische relatie staan. Zulke niet-harmonische spectra zijn van wezenlijk belang voor het synthetiseren van klanken als die van klokken, metallofonen, xylofonen en membranofonen.

Men kan met verschillende c : m-verhoudingen spectra opwekken die zijn samengesteld uit dezelfde zijbanden.

Met de volgende formule kunnen we elke c : m verhouding terugbrengen tot z'n basisvorm.

$$c = | c - m |$$

Bijvoorbeeld de c : m-verhouding 13 : 5 wordt dan als volgt vereenvoudigd.

```
C = | c  -  m |
C = | 13 -  5 | = 8
C = |  8 -  5 | = 3
C = |  3 -  5 | = 2
```

De basisvorm is dus c : m = 2 : 5

Toch zijn er verschillen hoorbaar tussen zo'n spectrum opgewekt met deze verwante c : m-verhoudingen. Bij eenzelfde modulatiediepte en verwante c : m-verhoudingen, zullen de overeenkomstige frequenties uit het spectrum een

verschillende amplitudes laten zien.
Heel duidelijk wordt dit hoorbaar met het volgende experiment.

experiment 4

```
OP2 output level en modulator EG data DX7:

output level 75
R1=15, R2=15, R3=15, R4=15
L1=99, L2=99, L3=99, L4=00

OP1 carrier:
Output level 99
R1=99, R2=99, R3=99, R4=99
L1=99, L2=99, L3=99, L4=00
```

We gaan dit experiment nu uitvoeren met de volgende c : m verhoudingen.

2:5, 3:5, 7:5, 8:5, 12:5 en 13:5

Wel echter met constante data voor de beide envelopes en output levels als aangegeven.

Bij diverse c : m-verhoudingen bemerken we als we een toon spelen dat niettemin het klankkleur- of timbreverloop bij deze onderscheiden c : m-verhoudingen toch heel anders verloopt.

Hoewel in alle gevallen een zelfde soort spectrum wordt gevormd, is de wijze waarop dit spectrum door middel van de modulator envelope wordt opgebouwd en weer afgebouwd, hoorbaar duidelijk anders.

Dat is als volgt eenvoudig in te zien. Op moment dat de modulatiediepte nog nul is, ofwel heel klein, zal alléén maar of voornamelijk, de carrierfrequentie in het uitgangssignaal aanwezig zijn. Bij het toenemen van de modulatiediepte onder invloed van de modulator envelope, zal de carrier echter steeds zachter worden ten gunste van de verschijnende zijbandfrequenties. In dit voorbeeld wordt dus steeds een zelfde soort spectrum gevormd vanuit een andere carrierfrequentie.

Door middel van de volgende formule zijn, uitgaande van een gegeven c : m–verhouding, alle andere c : m verhoudingen uit te rekenen die hetzelfde spectrum vormen.

```
| c ± nm | : m
```

We gaan bijvoorbeeld eens uit van de c : m verhouding

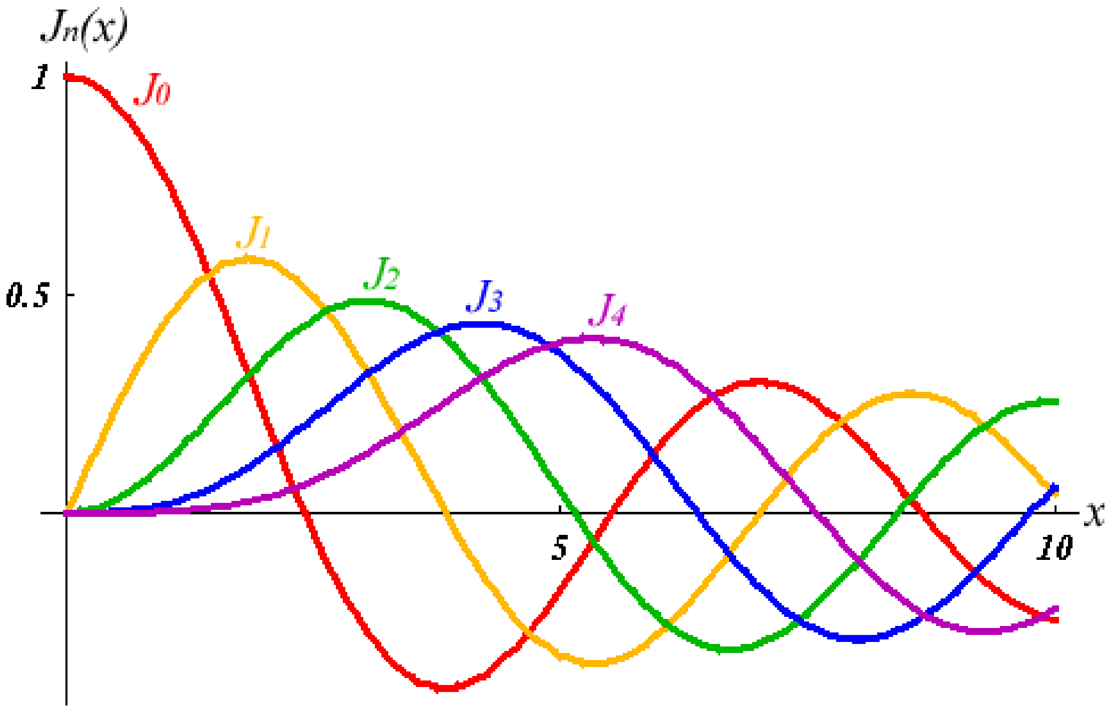
```
c : m = 1 : 2
```

De voorgaande formule toegepast levert dan het volgende resultaat op.

```
| c ± nm | : m = c : m

voor n = 1

| 1 + 2 |  : 2 = 3 : 2
| 1 – 2 |  : 2 = 1 : 2

voor n = 2

| 1 + 4 |  : 2 = 5 : 2
| 1 – 4 |  : 2 = 3 : 2

voor n = 3

| 1 + 6 |  : 2 = 7 : 2
| 1 – 6 |  : 2 = 5 : 2

voor n = 4

| 1 + 8 |  : 2 = 9 : 2
| 1 – 8 |  : 2 = 7 : 2

voor n = 5

| 1 +10 |  : 2 =11 : 2
| 1 -10 |  : 2 = 9 : 2

voor n = 6

| 1 +12 |  : 2 =13 : 2
| 1 -12 |  : 2 =11 : 2

etc.
```

Als we de laaste experimenten nauwkeurig hebben uitgevoerd, zullen we het volgende hebben opgemerkt. Bij het toenemen van de modulatiediepte, door het groter worden van het modulator output level, werd *globaal* genomen de *carrierfrequentie* steeds *zwakker*, en de

zijbandfrequenties steeds *sterker* in amplitude.
Globaal staat er in de vorige zin niet voor niets. Indien we opmerkzaam hebben geluisterd dan hebben we ook geconstateerd dat binnen dit globale verloop van zwakker worden van de carrier en het globale sterker worden van de zijbanden nog een fijnere modulaties waren te horen. Fluctuaties als aangegeven in onderstaande afbeelding. Deze curves staat in de wiskunde bekend als Besselfuncties.



In deze afbeelding (Wikipedia) zien we de curves die aangeven hoe de amplitudes van de carrier en de zijbanden fluctueren bij het toenemen van de modulatie-index.

Besselfunctie J_0 geeft de curve voor de carrier. J_1 en opvolgende J-nummers geven aan hoe de opeenvolgende zijbandparen in amplitude toe- en afnemen.

Bijvoorbeeld, de rode functie J_0, de curve voor voor de amplitudefluctuatie van de carrier. We zien dat bij het toenemen van de modulatie-index de amplitude steeds kleiner wordt en zelfs afneemt tot nul.

Vervolgens neemt die amplitude weer toe, maar dan met omgekeerde fase. De rode curve bevindt zich nu onder de x-as. Daarna neemt de amplitude weer af tot nul en neemt vervolgens weer toe met positief teken.

Bij een langzaam toenemend modulator output level, onder invloed van een langzame Attack Rate en een hoog modulator output level, zijn deze ‘volumeslingers’ een in het oorlopend karakteristiek van FM-synthese. Willen we dit kenmerk juist vermijden, dan is het belangrijk de modulatie-index klein te houden.

feedback

Het feedbackalgoritme kunnen we beschouwen als een minialgoritme dat overeenkomt met het basis-simple-FM-algoritme waarvan c : m = 1 : 1. Met dien verstande echter dat we in de feedbacklus geen aparte envelope data kunnen in voeren. De uitgang van de modulator wordt als het ware teruggekoppeld naar de eigen modulatie-ingang. Dit wordt ook wel zelfmodulatie genoemd.

Feedback maakte geen deel uit van het oorspronkelijke FM-model van Chowning, maar is een toevoeging van Yamaha. Het is een belangrijke uitbreiding op het oorspronkelijke simple FM-model.

We hebben zojuist aan de hand van de afbeelding met Besselfuncties gezien dat de amplitudeverhoudingen tussen carrier en zijbanden zich (grillig) wijzigen aan de hand van de modulatie-index.

Door feedback toe te passen onstaat een veel gelijkmatiger ampitudeverloop tussen de carrier en de zijbanden. Bij een juiste instelling van het feedback level kunnen we een signaal opwekken dat qua golfvorm, en wat spectrum betreft, vrijwel identiek is aan een zaagtandgolfvorm.