

Front End

Inleiding

Het gedrag van een ontvanger wordt grotendeels bepaald door het front end: het ruisgetal en de dynamic range.

De dynamic range van een ontvanger wordt bepaald door het kleinste detecteerbare signaal (KDS) en het grootste signalen die nog geen merkbare neven-producten veroorzaken. Het KDS wordt bepaald door het ruisgetal (NF) en het grootste signaal door de derde orde vervorming, omdat we daar alleen last van hebben (in een beetje ordentelijke ontvanger). Die vervorming wordt bepaald door het 'derde orde intercept punt' (IP3).

Het NF en het IP3 kunnen uitgedrukt worden in dBm (0 dBm = 1 mW).

Het dynamisch bereik wordt gedefinieerd als:

$$D = 2(IP3 - NFm) / 3 \dots(\text{dB})$$

Het meten en berekenen van het ruisgetal wordt hieronder uitgelegd. In de bovenstaande formule gebruik ik de term: NFm. Dat is het ruisgetal uitgedrukt in dBm en is in feite gelijk aan het KDS.

Een ontvanger met een ruisgetal van 0 dB en een bandbreedte van 2,4 kHz (SSB) detecteert een KDS van -140 dBm (zie elders). Bij die 2,4 kHz komt NF = 0 dB dus overeen met een NFm = -140 dBm.

1. Ruisgetal

$$\text{'ruis-factor' } F = (S_{in}/N_{in})/(S_{out}/N_{out})$$

waarin: S = 'signal power' en N = 'noise power'. $F > 1$!

Tegenwoordig is het woord '*noise figure*' (ruis-getal) gedefinieerd als:

$$NF = 10 \cdot \log F \dots(\text{dB}), \quad NF > 0$$

Andersom is dus $F = 10^{NF/10}$, wat we straks nodig hebben bij Friis.

1.1 Ruistemperatuur (random ruis)

$$P_N = kTB$$

waarin: P_N = ruisvermogen ...(W)
k = Boltzmann-constante: $1,38 \cdot 10^{-23}$...(J/K)
T = temperatuur ...(K)
B = bandbreedte ...(Hz)

Voorbeeld: In een weerstand bij kamertemp. (290K) wordt in een bandbreedte van 2,4 kHz: $1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 2400 \text{ W} = 0,96 \cdot 10^{-17} \text{ W} = 0,0096 \text{ fW}$ gegenereerd, *onafhankelijk van de grootte van R*.

Stel, een versterker is geplaatst tussen een 50 Ω -weerstand bij 290K en een ruisvrije ontvanger met een ingangs-impedantie van 50 Ω . De ruis aan de uitgang van de versterker bestaat uit twee componenten:

- 1 de versterkte ruis uit de weerstand, en
- 2 de ruis uit de versterker zelf.

Als we een *ruisvrije* versterker hadden met een opgewarmde 50 Ω -weerstand ($290\text{K} + T_e$) aan de ingang die net zoveel ruiste als de versterker boven, dan is:

T_e = de equivalente ruistemp. van de versterker.

We kunnen de ruis-factor dus ook schrijven als:

$$F = 1 + T_e/T_0$$

waarin: T_e = de equivalente ruistemp.
 T_0 = de 'kamertemp.' = 290K.

$$NF = 10 \cdot \log(T_e/T_0 + 1) \dots(\text{dB})$$

Andersom is de ruistemp.:

$$T_e = T_0 \cdot (10^{NF/10} - 1) \dots (K)$$

1.1.2 Vergelijkingstabel

We kunnen de grootheden ruisfactor F, ruisgetal NF, en de ruistemp. als volgt vergelijken:

ruis-factor F	ruisgetal NF ... (dB)	ruis-temp. T _e ... (K)
1,00	0	0
1,26	1	75,1
2,00	3	290
10	10	2.610
100	20	28.710

Het aardige van werken met de ruis-temp. is dat die eenvoudig opgeteld kunnen worden, **ook als het om een 'one port' (zoals een antenne) gaat**: een ontvanger met een ruis-temp. van T_{RX} aangesloten op een antenne met een ruis-temp. van T_{ant}, heeft een *stelsel*-temp. van:

$$T_{sys} = T_{ant} + T_{RX}$$

Dit ruis-temp.-concept moet ook worden gebruikt als correctie op ruis-getal-metingen bij ohmse-verliezen voor- of achter het te meten object!?!?

1.2 Aantal trappen achter elkaar... de Friis-formule

Drie trappen achter elkaar:

$$F[1,3] = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 \cdot G_2$$

waarin: F[1,3] = de ruisfactor aan het begin van het geheel,

F₁ = de ruisfactor van eerste trap,

F₂ = de ruisfactor van de tweede trap,

F₃ = de ruisfactor van de derde trap,

G_{f1}¹ = de gain (aant. keren versterking) van de eerste trap, en

G_{f2} = de gain van de tweede trap.

of meer algemeen:

$$F[1..k] = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 \cdot G_2 + \dots + (F_k - 1)/G_1 \cdot G_2 \dots G_{(k-1)} \text{ of}$$

$$F[n..k] = F_n + (F_{n+1} - 1)G_n + (F_{n+2} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} + (F_{n+3} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} \cdot G_{n+2} + \dots + (F_k - 1)/G_1 \cdot G_2 \dots G_{(k-1)}$$

Denk er om dat het hier om 'F' gaat! Die moet dus steeds berekend worden uit de FN in dB's². Hetzelfde geldt voor de gain.

1.2.1 Passieve trappen

Bij passieve trappen is 0 < G_f < 1. Er vindt geen toevoeging van ruis plaats: FN = 1.

Om een lang verhaal kort te maken: als een versterker voorafgegaan wordt door een verzwakker wordt:

$$G_{tot} = G_1 + G_2 = -V_1 + G_2 \dots (dB), \text{ en}$$

$$FN_{tot} = V_1 + FN_2 \dots (dB)$$

1.2.2 Een voorbeeld

We zetten twee versterkers achter elkaar met daartussen een verzwakker.

De eerste versterker heeft een versterking van 12 dB en een ruisgetal van 8 dB.

De verzwakker verzwakt 6 dB.

¹ Met G_f wordt het aantal keren versterking bedoeld: de versterkingsfactor in tegenstelling tot G ... (dB).

² denk er om dat het over **vermogen** gaat en niet over spanning!

De tweede versterker heeft een versterking van 7 dB met een ruisgetal van 11 dB.

Wat is de totale versterking en wat is het ruisgetal van het geheel?

Dus: $G_1 = 12$ dB, $NF_1 = 8$ dB

$G_2 = -6$ dB

$G_3 = 7$ dB, $NF_3 = 11$ dB

Opl.: $G[1..3] = G_1 + G_2 + G_3 = 12 - 6 + 7 = \underline{13}$ dB.

Voor het totale ruisgetal **nemen we de tweede versterker samen met de verzwakker**³. Het ruisgetal van die combinatie: $FN[2,3] = 6 + 11 = 17$ dB.

We moeten met Friis de berekening aan de gang voor met de *ruisfactor*.

Met $F = 10^{NF/10}$ en de calculator vinden we:

12 dB = 15,85x 11 dB = 12,59x

8 dB = 6,31x

1 dB = 1,26x

17 dB = 50,12x

Friis: $F[1..2] = F_1 + (F_{23}-1)/G_1 = 6,31 + (50,12 - 1)/15,85 = 9,41 \therefore \underline{9,74}$ dB

Zonder verzwakker er tussen zou het geworden zijn:

$G[1..2] = 12 + 7 = \underline{19}$ dB

Friis: $F[1..2] = 6,31 + (12,59 - 1)/15,85 = 7,04 \therefore \underline{8,48}$ dB.

³ samennemen met de eerste versterker geeft verkeerde uitkomsten!

2. Derde orde intercept-punt: IP3

Het IP3 komt overeen met de grootste signalen die nog onvervormd doorgegeven worden, dwz. de vervorming ligt onder de ruis of is hooguit gelijk aan de ruis. Onder 'bepaalde condities' ontstaan er nevensignalen wanneer meer dan één signaal wordt toegevoerd aan de ingang. Om die nevensignalen gaat het.

Bij enige selectiviteit aan de ingang zullen we uitsluitend met 3^e-orde-producten te maken hebben.

Het getal dat gevonden wordt voor het IP3 is een denkbeeldig getal. De DUT⁴ zou kapot (kunnen) gaan als een signaal van die grootte zou worden toegevoerd!

We zullen steeds het IIP3, het *ingangs*-IP3 bepalen. Fabrikanten van versterkers willen graag het OIP3, het *uitgangs*-IP3 opgeven omdat dat getal groter is. Hoe zit dat?

2.1 Ingangs- en uitgangs-IP3

Bij een DUT is het IIP3 = OIP3 - G ... (dB).

Bij een versterker zal het OIP3 dus groter zijn dan het IIP3. Bij bijv. een passieve mixer (met een negatieve versterking) is het juist andersom. Het is dus zaak om bij specificaties te kijken of het de ingang of de uitgang betreft.

2.2 Het meten van het OIP3

Het meten van een IP3 wordt meestal gedaan met twee signalen die dicht bij elkaar staan. We spreken dan van het **two tone third order intercept point**. We doen net of dit de juiste meting is!

We kunnen natuurlijk twee signalen f_1 en f_2 invoeren en kijken bij welke sterkte de derde orde producten $2f_1 - f_2$ en $2f_2 - f_1$ boven de ruis uitkomen. Dit stelt hoge eisen aan de bron wat IP3 betreft. Het is handiger om grotere signalen in te voeren⁵ zodat van elk $P_{out} =$ bijv. -10 dBm. Als de IP3-producten dan bijv. 60 dB onder die ingangssignalen liggen (dBc) dan is het OIP3: +20 dBm. Hoe komen we hier aan?

$$OIP3 = P_{out} + dBc/2$$

hier: OIP3 = -10 + 60/2 = +20 dBm.

IIP3 wordt dan = OIP3 - G.

2.3 Aantal trappen achter elkaar ...

Net als bij het bepalen van het ruisgetal zal het totale IP3 mede bepaald worden door de afzonderlijke IP3's en de afzonderlijke versterkingen van een aantal trappen achter elkaar.

Stel, we hebben een drie-traps-versterker die bestaat uit een versterker met een OIP3 van + 21 dBm (125,9 x het *vermogen* tov 0 dBm!) met een versterking van 15 dB (31,62x). Die versterker wordt gevolgd door een band pass filter (of verzwakker) die een doorlaatlomping van 3 dB (2x) heeft. De derde versterker heeft een OIP3 van +25 dBm (316,2x) met een versterking van 15 dB (31,62x). Wat is de versterking en het IIP3 van het geheel?

Even in een tabelletje:

	trap 1	trap 2	trap 3
Gain	15 dB (31,62x)	-3 dB (0,5x)	15 dB (31,62x)
OIP3	+21 dBm (125,9x)	∞ dBm (∞)	+25 dBm (316,2x)

$$G[1..3] = G_1 + G_2 + G_3 = 15 - 3 + 15 = \underline{27 \text{ dB}}$$

$$1/OIP3[1..k] = 1/OIP3_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \dots G_k + 1/OIP3_2 \cdot G_3 \dots G_k + \dots + 1/OIP3_{(k-1)} \cdot G_k + 1/OIP3_k \text{ of}$$

$$1/OIP3[n..k] = 1/OIP3_n \cdot G_{n+1} \cdot G_{n+2} \dots G_k + 1/OIP3_{n+1} \cdot G_{n+2} \cdot G_{n+3} \dots G_k + \dots + 1/OIP3_{(k-1)} \cdot G_k + 1/OIP3_k$$

⁴ device under test

⁵ in ieder geval zo groot dat de intermodulatie-producten minstens 10 dB boven de ruis uitkomen.

$$\begin{aligned}
1/OIP3[1..3] &= 1/OIP3_1 \cdot G_2 \cdot G_3 + 1/OIP3_2 \cdot G_3 + 1/OIP3_3 \\
&= 1/125,9 \cdot 0,5 \cdot 31,62 + 1/\infty \cdot 31,62 + 1/316,2 \\
&= 502 \cdot 10^{-6} + 0 + 3162 \cdot 10^{-6} = 3664 \cdot 10^{-6}
\end{aligned}$$

$$OIP3[1..3] = 272,9 = 24,36 \text{ dBm}$$

$$IIP3[1..3] = OIP3[1..3] - G[1..3] = 24,36 - 27 = \underline{-2,64 \text{ dBm}}$$

Hoe zit het met het IIP3?

IIP3 = OIP3 - G, dat wil zeggen: als het IIP3 van een aantal trappen berekend moet worden, zal het gevonden OIP3 **van de hele keten** gedeeld moeten worden door **de totale versterking** van diezelfde keten.

3. Berekenen van de Dynamic Range

Het berekenen van de dynamic range ligt nu binnen handbereik al is het een heel geklungel. Daar moet natuurlijk een programma voor geschreven worden. Eerst zullen we nog een exercitie doen om te zien wat we allemaal tegenkomen. Daarvoor neem ik het voorbeeld van mijn verhaal:

GAIN-DISTRIBUTION of 'Versterkingsverdeling' in ontvangers, in Electron van aug. 1982 - no 8, blz.412 ev.

Arie Dogterom, PAoEZ schreef mij persoonlijk een brief daarover, die ik nu pas ga begrijpen!

Het gaat om een Marimac mixer met een IIP3 = +14 dBm en een conversieverlies van 6 dB, gevolgd door een N6RY-versterker met een gain van 16 dB en een IIP3 = + 15 dBm, gevolgd door een XF9B-filter met een doorlaatdemping van 4 dB. De mf-versterker daarachter zou dan een NF van slechts 24 dB hoeven te hebben. Dat laatste is natuurlijk fout! Daar ging Arie toch van uit.

Laten we eens zien:

	trap 1 Marimac 117	trap 2 N6RY	trap 3 XF9B
Gain	-6 dB (0,25)	+16 dB (39,81)	-4 dB (0,40)
OIP3	+8 dBm (6,31)	+31 dBm (1259)	∞ dBm (∞)
NF		4 dB (2,51)	24+4 dB (631)??

$$G[1..3] = -6 + 16 - 4 = +6 \text{ dB}$$

Ruis

We nemen de Marimac samen met de N6RY: FN[12] = 4 + 6 = 10 dB (10). G[12] = 10 dB (10).

$$\text{Friis: } F[1..2] = F_{12} + (F_3 - 1)/G_{12} = 10 + (631 - 1)/10 = 73 \implies \text{FN} = 18,63 \text{ dB.}$$

Dat vond Arie ook! Dat de boel dan verder zo slecht uitpakt, is niet vreemd.

Hoe groot mag FN van de mf-versterker dan zijn om de zaak niet meer dan 3 dB te degraderen?

Voor FN = 13 dB is $F = 19,95 \implies (F_3 - 1)G_{12} \approx 9,95 \implies F_3 \approx 100,5$ of $\text{FN}_{mf} \approx 20 - 4 = 16 \text{ dB}$.

Dat valt nog niet tegen!

Laten we hier eens mee verder rekenen.

IIP3

$$\begin{aligned}
1/OIP3[1..3] &= 1 / OIP3_1 \cdot G_2 \cdot G_3 + 1 / OIP3_2 \cdot G_3 + 1 / OIP3_3 \\
&= 1 / 6,31 \cdot 39,81 \cdot 0,4 + 1 / 1259 \cdot 0,4 + 1 / \infty \\
&= 1 / 100,48 + 1 / 503,6 + 0
\end{aligned}$$

$$= 0,00995 + 0,0020 + 0 = 0,01195$$

$$\text{OIP3}[1..3] = 1 / 0,01195 = 83,68 \implies +19,23 \text{ dBm}$$

$$\text{IIP3}[1..3] = \text{OIP3}_{1..3} - G_{1..3} = +19,23 - 6 = +13,23 \text{ dBm.}$$

Er van uitgaande dat het XF9B-filter 'alles' hebben kan, degradeert de N6RY de Marimac dus niet!

Dynamic Range

$$D = 2(\text{IIP3} - \text{NFm})/3, \text{ bij } 2,4 \text{ kHz: } D = 2(\text{IIP3} + 140 - \text{NF})/3$$

$$D = 2(13,23 + 140 - 13)/3 = 93,5 \text{ dB}$$

Die wordt dus geheel door de Marimac bepaald.

4. Een Programma?

4.1 Preliminary Investigation Report (PIR)

4.1.1 Inleiding

De vraag is of er een programma te maken is dat ons kan helpen front ends van ontvangers te ontwerpen. Daarvoor is het niet voldoende om het ruisgetal FN, het IIP3 en het dynamisch bereik (D) van het geheel te berekenen. Er is dan geen informatie over de bottleneck(s) in het front end. We willen de bovengenoemde drie grootheden weten *op het grensvlak* tussen de trappen! Dan is direct te zien waar problemen, zoals in de gain distribution, zitten. We moeten in ieder geval de IIP3's berekenen. De OIP3's stroken niet met de FN's.

Natuurlijk kan voor elk grensvlak vanaf dat vlak elke trap daarna betrokken worden om de antwoorden te vinden. Het trucje om een passieve trap (verzwakker, filter, DBM) samen te nemen met een actieve trap daarachter, wordt in een programma ingewikkeld. Kunnen we de algemene formules blijven gebruiken als we voor verzwakkers en (brede) bandfilters het $IP3 = \infty$, en het ruisgetal $FN = 0$ stellen? Voor DBM's zou den natuurlijk alleen het ruisgetal die extreme waarde krijgen.

Bovendien zal vaak uitgegaan worden van gemeten waarden (zoals het ruisgetal van de middenfrequentversterker). Kan niet simpelweg steeds een trap naar voren geschoven worden⁶ en gerekend worden met de gevonden waarden op het grensvlak daar direct achter?

We moeten van achteren naar voren werken! Dat betekent ook dat er gegevens over de laatste trap(en) bekend moet zijn of aangenomen worden. Om derwille van de begrijpbaarheid van het programma is het raadzaam om van default-waarden uit te gaan en de rekenresultaten daarvan te tonen. Er hoeft dan weinig uitgelegd te worden!

We doen het volgende:

- de laatste trap is de middenfrequentversterker (if van intermediate frequency) waarvan alleen het ruisgetal van belang is,
- de trap daarvoor is dus het bandbreedte-bepalende bandfilter (if-fi),
- de trap dáárvoor wordt een versterker die op zijn minst zorgt voor de aanpassing van 50 Ω naar, zeg, 500 Ω (in geval van bv. een XF9B-filter van KVG).

Die worden dus vastgelegd! De parameters kunnen uiteraard gewijzigd worden. Het aantal en soort trappen er vóór is arbitrair en kan vrij gekozen worden.

In geval er twee if-fi's gekozen zouden worden, is er sprake van een dubbel-super. Voor de berekening van het dynamisch bereik zou dan de bandbreedte van het smalste filter genomen kunnen worden. Bovendien wordt aangenomen dat de trappen achter dat filter *niet meer bijdragen aan de vervorming*. Het zou zodoende mogelijk worden om van een dubbelsuper het dynamisch bereik te bepalen voor signalen die het eerste if-filter nog doorlaat als de bandbreedte daarvan groter gekozen wordt. Wordt de bandbreedte daarvan even groot of kleiner gekozen dan van het tweede if-filter, dan doen de trappen tussen die filters niet meer mee bij de berekeningen en vinden we zodoende het dynamisch bereik voor signalen die buiten het eerste bandfilter vallen.

Willicht wordt dat ingewikkeld. Het programma moet dan 'onthouden' waar het smalste if-filter zit en de huishouding betreffende IP3 van de trappen daarachter bijhouden. In geval van een dubbel-super kan altijd in twee simulaties-met-één-if-filter de uitkomst verkregen worden dus zien we af van het rechtstreeks simuleren van een dubbelsuper.

4.1.2 De rekengrootheden

In iedere 'trap' van een front end zitten een of meer componenten. De 'trap' is echter 'de kleinste reken-eenheid'. Daarvan zijn van belang:

- het ruisgetal NF ... (dB),
- het input 'two tone third order intermodulation point': IIP3 ... (dBm),
- de versterking of 'gain' ... (dB), en
- de bandbreedte van het middenfrequent-filter.

Daaruit berekenen we op ieder scheidsvlak:

- de 'systeem-bandbreedte' die bepaald wordt door het if-filter ... (kHz),

⁶ we moeten van achteren naar voren werken!

- de 'totale' versterking ...(dB),
- het IIP3 ...(dBm),
- het ruisgetal ...(dB),
- het dynamisch bereik ...(dB), voor
- het aantal trappen.

4.1.3 De soorten trappen

De volgende 'trappen' volstaan in ons model:

- versterkers (amp),
- verzwakkers (att),
- double balanced mixers (DBM) met een vast conversieverlies van 6 dB,
- actieve mixers (mixer),
- (brede) band pass filters (BP-fi), en
- bandbreedte bepalende middenfrequent filter (if-fi).

Elke trap heeft als parameters: NF, IP3, en G, allen in dB's/dBm's. Afhankelijk van de trap zijn die eigenschappen impliciet of expliciet, dus:

- amp - expliciet: NF, IP3 en G,
- att - expliciet: verzwakking (= -G), impliciet: NF = 0 dB en IP3 = ∞ dBm,
- DBM - expliciet: IP3, impliciet: G = -6 dB en NF = 0 dB,
- mixer - expliciet: NF, IP3 en G,
- BP-fi - expliciet: doorlaatdemping (-G), impliciet: NF = 0 dB en IP3 = ∞ dBm,
- if-fi - expliciet: doorlaatdemping (-G), *bandbreedte ... (kHz)*, NF = 0 en IP3 = ∞.

Als invoer nodig:

INPUT:

- het aantal trappen
- het soort trap (laten kiezen uit een menu)
- per trap de *expliciete parameters*

Het aantal trappen zullen we beperken tot 9, inclusief de laatste 'vaste' drie. Daar kan elk front end mee gedefinieerd worden. Er zal trouwens op het scherm niet veel meer ruimte zijn als we die nog een beetje grafisch willen voorstellen.

Voor de eenvoud wordt de soort trap uit een menu gekozen.

OUTPUT:

Aan het begin van elke trap (op de scheidslijn) wordt gegeven:

- G ...(dB)
- NF ...(db)
- IIP3 ...(dBm)
- D ...(dB)

4.1.4 De structuur

Er wordt uitgegaan van enig 'voorwerk' van de ontwerper. Dat wil zeggen dat hij weet hoeveel trappen hij nodig zal hebben voor het model. Overigens kan het aantal trappen uitgebreid of verminderd worden. Wellicht is het handig om trappen te kunnen verwisselen en te kopiëren.

Net als bij freqplan uitgaan van default-waarden die gewijzigd kunnen worden. Dus na een voorbeeld vragen om wijzigingen, waarna de berekeningen voor de nieuwe situatie uitgevoerd worden. Op deze manier kan ge-optimaliseerd worden!

Wellicht kan half-grafisch gewerkt worden in een tabel, zodat de uitkomsten overzichtelijk worden zoals in een blokschema.

4.1.4 De formules nader bekeken

RUISVLOER

Bij 1 Hz, minFloor = -174 dBm. Elke verdubbeling van de bandbreedte telt daar 3 dB bij. Bv.
 $B = 2048 \text{ Hz} = 2^{11} \text{ Hz} \implies \text{NFloor} = -174 + 33 = -141 \text{ dBm}$.

Algemener (en nauwkeuriger): $\text{NFloor} = \text{minFloor} + 10 \cdot \log B \dots (\text{dBm})$

RUISGETAL IN DBM (NFm):

$\text{NFm} = \text{NFloor} + \text{NF} \dots (\text{dBm})$

VERVORMING: IP3

$$IIP3 = OIP3 - G \dots(\text{dB})$$

VERALGEMENISEREN RUISBEREKENING

Bij de handmatige ruisberekeningen wordt vereenvoudigd door een passieve trap (verzwakker, filter of DBM) samen te nemen met de versterker er achter. Voor een programma mag de berekening ingewikkeld zijn als hij maar uniform is.

Eerst nog even filosoferen over versterkers met verzwakkers. De ruis wordt altijd naar de ingang 'omgerekend', maar ontstaat natuurlijk in de versterker zelf. Dat betekent dat (wat de ruis aangaat) een verzwakker achter een versterker beter is dan een er voor, omdat de ruis en het signaal dan even veel verzwakt worden, ergo het ruisgetal verandert niet, de versterking wel.

Bij een verzwakker vóór de versterker wordt de signaal/ruis-verhouding slechter, dus het ruisgetal wordt groter en de versterking neemt (evenveel) af; de hoeveelheid ruis aan de uitgang blijft dezelfde.

$$\text{Dus: } NF_{\text{uit}} = G + NF \dots(\text{dB}).$$

Zonder verzwakker is $NF = NF_{\text{uit}} - G$. Mèt verzwakker (met versterking G') wordt dus:

$$NF_{\text{nieuw}} = NF_{\text{uit}} - G - G', \text{ met } NF_{\text{uit}} \text{ is constant, zodat}$$

$$NF_{\text{nieuw}} = NF - G, \text{ en}$$

$$G_{\text{nieuw}} = G + G'.$$

$$F[1]^7 = F_1 + (F_2-1)/G_1 + (F_3-1)/G_1 \cdot G_2 + \dots + (F_k-1)/G_1 \cdot G_2 \dots G_{(k-1)}$$

Voor de eenvoud nemen we twee versterkers met daar tussenin een verzwakker:

amp	att	amp
G_1	G_2	(G_3)
NF_1	$NF_2=0$	NF_3

$$\text{Algemeen: } F[1] = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 \cdot G_2, \text{ waarin } F_2 = 1, \text{ zodat:}$$

$$= F_1 + (F_3 - 1)/G_1 \cdot G_2 \dots\dots\dots(1)$$

Met het samennemen van de verzwakker met de versterker daarachter wordt de nieuwe trap a:

$$G_a = G_2 + G_3 \text{ en } NF_a = NF_3 - G_2.$$

$$F[1] = F_1 + (F_a - 1)/G_1, \text{ waarin } F_a = F_3/G_2$$

$$\text{dus: } = F_1 + (F_3/G_2 - 1)/G_1 \dots\dots\dots(2)$$

(1) en (2) zijn niet gelijk!!!!

Dit betekent dat bij een verzwakker het handmatige trucje geprogrammeerd moet worden. Een verzwakker, filter of DBM hoeft dus ook geen ruisgetal ($NF=0$) te hebben!

Arie Dogterom mailde mij op 13-5'05 dat het ruisgetal van een passieve component gelijk is aan de verzwakking daarvan! Dat betekent dat(1) wordt:

$$\text{Algemeen: } F[1] = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 \cdot G_2, \text{ **waarin } F_2 = 1/G_2, \text{ zodat:}**$$

$$= F_1 + (1/G_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 \cdot G_2$$

$$= F_1 + 1/G_1 \cdot G_2 - 1/G_1 + F_3/G_1 \cdot G_2 - 1/G_1 \cdot G_2$$

$$\text{dus: } = F_1 + (F_3/G_2 - 1)/G_1 \dots\dots\dots(3)$$

(2) en (3) zijn gelijk, dus met de juiste aanname blijkt het correct!

We zullen straks zien dat de verscheidene ruisgetallen bepaald kunnen worden door het ruisgetal van 'de versterker' en het ruisgetal van het geheel daarachter.

⁷ voortaan schrijf ik hier het nummer van de trap waarvoor berekend wordt (onafhankelijk van het aantal trappen). Bovendien wordt voor de versterkingsfactor en de versterking-in-dB's hetzelfde symbool: G gebruikt. Waar het om gaat blijkt steeds duidelijk uit plaats in een formule.

VERALGEMENISEREN IP3-BEREKENING

Bij de handmatige IP3-berekeningen wordt vereenvoudigd door een passieve trap (verzwakker of filter) samen te nemen met de versterker er achter. Voor een programma mag de berekening ingewikkeld zijn als hij maar uniform is.

$$1/O^8[1] = 1/O_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \dots G_k + 1/O_n \cdot G_{(n+1)} \dots G_k + \dots + 1/O_{(k-1)} \cdot G_k + 1/O_k$$

Voor de eenvoud nemen we weer twee versterkers met daar tussenin een verzwakker:

amp	att	amp
G_1	G_2	G_3
$OIP3_1$	$OIP3_2 = \infty$	$OIP3_3$

Algemeen:

$$1/O[1] = 1/O_1 \cdot G_2 \cdot G_3 + 1/O_2 \cdot G_3 + 1/O_3 \text{ waarin } O_2 = \infty, \text{ zodat:}$$

$$= 1/O_1 \cdot G_2 \cdot G_3 + 1/O_3$$

Met het samennemen van de verzwakker met de versterker daarachter:

$$1/O[1] = 1/O_1 \cdot G_a + 1/O_a, \text{ waarin: } G_a = G_2 \cdot G_3 \text{ en}$$

$O_a = O_3$, denk er om! Dat is een eigenschap van de versterker **aan de uitgang**, en die verandert niet met er een verzwakker voor te plaatsen.

Ergo: het generaliseren is toegestaan.

KUNNEN WE 'BUBBELEN'?

Hiermee bedoel ik: kunnen we de gevraagde waarden voor trap n berekenen uit de gevonden uitkomsten van trap n+1 ?

Voor de ruis

$$F[1] = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 \cdot G_2 + \dots + (F_k - 1)/G_1 \cdot G_2 \dots G_{(k-1)}$$

Voor trap_n geldt dus:

$$F[n] = F_n + (F_{n+1} - 1)/G_n + (F_{n+2} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} + (F_{n+3} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} \cdot G_{n+2} + \text{etc.}$$

$$F[n] - F_n - (F_{n+1} - 1)/G_n = (F_{n+2} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} + (F_{n+3} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} \cdot G_{n+2} + \text{etc.(a)}$$

Voor trap_n+1 geldt:

$$F[n+1] = F_{n+1} + (F_{n+2} - 1)/G_{n+1} + (F_{n+3} - 1)/G_{n+1} \cdot G_{n+2} + \text{etc.}$$

$$F[n+1]/G_n = F_{n+1}/G_n + (F_{n+2} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} + (F_{n+3} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} \cdot G_{n+2} + \text{etc.}$$

$$F[n+1]/G_n - F_{n+1}/G_n = (F_{n+2} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} + (F_{n+3} - 1)/G_n \cdot G_{n+1} \cdot G_{n+2} + \text{etc.(b)}$$

Uit (a) en (b) volgt:

$$F[n] - F_n - (F_{n+1} - 1)/G_n = F[n+1]/G_n - F_{n+1}/G_n$$

$$F[n] = F_n + (F_{n+1} - 1)/G_n - F_{n+1}/G_n + F[n+1]/G_n$$

$$F[n] = F_n - 1/G_n + F[n+1]/G_n$$

$$\mathbf{F[n] = F_n + (F[n+1] - 1)/G_n}$$

Dat kan dus domweg!

Voor het IP3

⁸ voor de OIP3-factor schrijven we voortaan: O

$$1/O[1] = 1/O_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \dots G_k + 1/O_n \cdot G_{(n+1)} \dots G_k + \dots + 1/O_{(k-1)} \cdot G_k + 1/O_k$$

Voor trap_n geldt dus:

$$1/O[n] = 1/O_n \cdot G_{n+1} \cdot G_{n+2} \dots G_k + 1/O_{n+1} \cdot G_{n+2} \cdot G_{n+3} \dots G_k + 1/O_{n+2} \cdot G_{n+3} \cdot G_{n+4} \dots G_k + \text{etc.} \dots (c)$$

Voor trap_{n+1} geldt:

$$1/O[n+1] = 1/O_{n+1} \cdot G_{n+2} \cdot G_{n+3} \dots G_k + 1/O_{n+2} \cdot G_{n+3} \cdot G_{n+4} \dots G_k + \text{etc.} \dots (d)$$

Uit (c) en (d) blijkt:

$$1/O[n] = 1/O_n \cdot G_{n+1} \cdot G_{n+2} \dots G_k + 1/O[n+1]$$

De hier gevonden O[n] is het OIP3 **aan het einde van de rit!!** $G_{n+1} \cdot G_{n+2} \dots G_k$ is vanaf trap_{n+2} de versterking tot aan het eind, de totale versterking G[n+1], zodat geldt:

$$1/O[n] = 1/O_n \cdot G[n+1] + 1/O[n+1]$$

O[n+1] is daarin: $G[n+1] \cdot \text{IIP3}[n+1]$, wat we straks nodig zullen hebben.

Een rekenvoorbeeld:

trap1	trap2	trap3	trap4	trap5 v	trap6	trap7
BP-fi	att	amp	DBM	amp	if-fi	if
-----	--/\--	-- >---	---X---	-- >---	-----	-- >---
G = -2	G = -3	G = 6	G = -6	G = 10	G = -4	
		IP3= 25	IP3= 14	IP3= 30	B =	
		NF= 5		NF= 4	2,4 kHz	NF= 6
5	7	10	4	10	0	<< Gt
9	7	4	13,97	30	∞	<< IP3
12,9	10,9	7,9	11	5,32	10	6 << NF
91	91	91	96	119,9	113	<< D

Laten we trap_3 nog eens berekenen uit trap_4 met de 'nieuw' gevonden formules:

$$\begin{aligned} F[3] &= F_3 + (F[4] - 1)/G_3 \\ &= 10^{0,5} + (10^{1,1} - 1)/10^{0,6} \\ &= 3,1623 + (12,59 - 1)/3,9811 \\ &= 6,0735555 \implies \text{NF}[3] = 7,83 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1/O[3] &= 1/O_3 \cdot G[4] + 1/O[4] = 1/O_3 \cdot G[4] + 1/G[4] \cdot \text{IIP3}[4] \\ &= 1/10^{3,1} \cdot 10^{0,4} + 1/10^{1,379} \cdot 10^{0,4} \\ &= 1/10^{3,5} + 1/10^{1,779} \\ &= 3,16 \cdot 10^{-4} + 398 \cdot 10^{-4} \\ &= 401,16 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O[3] &= 24,93 \\ \text{OIP3}[3] &= 10 \cdot \log 24,93 = 13,97 \text{ dB} \end{aligned}$$

Rechteo rechtaan was dit:

$$\begin{aligned} 1/\text{OIP3}[3] &= 1/\text{OIP3}_3 \cdot G_4 \cdot G_5 + 1/\text{OIP3}_4 \cdot G_5 + 1/\text{OIP3}_5 \\ &= 1/10^{3,1} \cdot 10^{-0,6} \cdot 10 + 1/10^{0,8} \cdot 10 + 1/10^{1,1} \\ &= 1/10^{3,5} + 1/10^{1,8} + 1/10^4 \\ &= 10^{-3,5} + 10^{-1,8} + 10^{-4} \\ &= 3,16 \cdot 10^{-4} + 398 \cdot 10^{-4} + 10^{-4} \end{aligned}$$

$$= 402,16 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{OIP3}[3] = 10(\log 10^4 - \log 402,16) = 10(4 - 2,60) = 14,0 \text{ dBm}$$

$$\text{IIP3}[6] = 14,0 - 10 + 6 - 6 = 4 \text{ dBm}$$

Niet om het een of ander, maar ik mis bij 'de korte berekening' een hele term, die ik hier vet heb afgedrukt. Het scheelt allemaal niet zo veel (dat is nu juist zo beroerd) maar **het is niet goed!** Vooral als je zo'n ketting-berekening maakt, wordt de fout als maar groter.

Conclusie:

- Voor de ruis mogen we 'bubbelen', dwz. we kunnen het ruisgetal op een scheidsvlak steeds vinden uit de gevonden waarde voor 'het spul er achter' \wedge het ruisgetal van de betreffende trap. Voor passieve trappen berekenen we de waarde door $\text{NF}[i] = \text{NF}[i-1] - G_i$.
- Voor de vervorming mogen we algemeniseren (zonder rekening te houden met passieve trappen). We kunnen echter NIET bubbelen.

BEREKENING DYNAMISCH BEREIK

$$D = 2(\text{IIP3} - \text{NFm}) / 3 \dots(\text{dB})$$

ANDERE CONCLUSIES:

0 < n < 10 Gezien het voorbeeld in mijn artikel in Electron, moeten er toch 9 trappen achter elkaar gezet kunnen worden. Zoals we eerder zagen ligt de soort van de laatste drie vast.

trap_n = versterker

Omdat van achteren naar voren gewerkt moet worden, zal de laatste trap een versterker moeten zijn met op zijn minst een bekend ruisgetal NF. Vrij snel daarvoor moet een trap komen die het IP3 bepaalt.

Dit moet in het programma uitgelegd worden.

verzwakker, filter: IP3 = ∞

De gebruiker hoeft die niet op te geven (impliciet).

IP3

Extern, naar de gebruiker, werken we steeds met het IIP3, zowel in de input als de output. Die wordt dus ook opgevraagd! De gebruiker moet uitgelegd worden hoe hij die eventueel uit het OIP3 en G kan berekenen.

4.2 Global Design Spec. (GDS)

In een aantal tekst-schermen wordt uitgelegd wat het programma doet met enige toelichting op de theorie.

Als eerste parameter wordt het aantal trappen opgevraagd (n).

Daarmee wordt een voorbeeld met default-waarden getoond.

Door wijzigingen kan het voorbeeld aangepast worden naar eigen keuze. Het enige dat niet veranderd kan worden is 'de aard' van de laatste drie trappen.

Er wordt een blokdiagram of tabel getoond waarin de opgevraagde trappen zijn aangegeven met default spec, zodat er in ieder geval iets zinnigs uit komt. G, IIP3 FN en D worden hiermee ook berekend. Deze waarden staan steeds op de scheidslijn tussen twee trappen en **geven de waarden aan die men daar zou meten als de voorgaande trappen waren losgenomen.**

De gebruiker kan nu de relevante parameters wijzigen, waarna de berekening opnieuw wordt uitgevoerd, zodat hij kan optimaliseren. Het programma optimaliseert niet zelf!

Enige vorm van een user manual zal uitleggen hoe de uitkomsten geïnterpreteerd moeten worden en wat er van de uitkomsten te leren valt om tot verbetering te komen.

4.3 Detailed Design Spec (DDS)

EERSTE TEKST-SCHERM

'logootje' met mijn naam etc. zoals in freqplan.

Dit programma berekent het ruisgetal en het dynamisch bereik van ontvangers voor derde orde producten. Verondersteld wordt dat alleen het front end (eventueel t/m het bandbreedte bepalende mf-filter) berekend wordt. Het aantal trappen wordt beperkt tot 10.

Omdat bij dit soort berekeningen van achteren naar voren gewerkt wordt, zal de laatste trap altijd een versterker moeten zijn. Als de voorlaatste trap het bandbreedte bepalende filter is, wordt aangenomen dat er in die versterker geen 3e orde intermodulatie meer plaats vindt. De versterking is hier ook niet van belang. Het ruisgetal echter des te meer!

Van de passieve componenten (filters, verzwakkers, DBM's) wordt aangenomen dat zij niet bijdragen aan de ruis. Van filters en verzwakkers wordt bovendien aangenomen dat zij niet bijdragen aan de vervorming.

Druk op <Enter> oid. om verder te gaan.

TWEEDE TEKST-SCHERM

Als u de bandbreedte, het aantal trappen en de soort trappen hebt ingegeven, vindt met die gegevens een berekening plaats met default-waarden voor de componenten. Daarna kunt u die waarden naar believen wijzigen om een werkelijkheid te simuleren of om te optimaliseren voor een ontwerp.

Met 'IP3' wordt het ingangs-IP3 bedoeld ($IP3 = \text{uitg.IP3} - G$). Met een negatieve waarde voor G (gain, versterking) wordt verzwakking aangegeven.

Hoeveel trappen/componenten komen er achter elkaar? (2..10): ___

Bij welke bandbreedte moet berekend worden? (0,1..1000 kHz): ___

| De [n]-de trap is een versterker.

| De [n-1]-de trap is een:

- | 1. verzwakker
- | 2. een DBM (double balanced mixer)
- | 3. een actieve mixer
- | 4. een versterker
- | 5. een bandfilter

| kies: (1..5): _

In geval van 5 wordt gevraagd of dit bandfilter de B bepaalt, zo ja dan wordt van trap[n] het $IP3 = \infty$ en $G = 0$ dB gemaakt.

Als $[n-1] > 1$ wordt de text met | er voor vervangen door:

| De <n-2>-de trap is een:

- | 1. verzwakker
- | 2. een DBM (double balanced mixer)
- | 3. een actieve mixer
- | 4. een versterker
- | 5. een bandfilter

| kies: (1..5): _

In geval 5 wordt NIET meer gevraagd naar B.

Etc. tot $[n-1] = 1$.

Voor de voorstelling van de 'trein' hebben we horizontaal 80 posities en verticaal 25. Worst case hebben we 10 trappen, 8 posities per trap. Dat kan er uitzien als:

trap1	trap2	trap3	trap4	trap5	trap6	trap7	trap8	trap9	trap10
att	BP-fi	amp	BP-fi	att	amp	DBM	amp	if-fi	if
--/\/--	-- >--	-----	-----	--/\/--	-- >--	--X--	-- >--	-----	-- >--
G = -10	G = -2	G = 16	G = -2	G = -3	G = 6	G = -6	G = 10	G = -4	
		IP3= 15			IP3= 25	IP3= 14	IP3= 30	B =	
		NF= 4			NF= 5		NF= 4	2,4 kHz	NF= 6
??	??	??	9	7	8	14	30	40	<< IP3
??	??	??	13	11	8	11	5	10	6 << NF
??	??	??	91	91	91	96	110	113	<< D

Het IIP3 wordt van achteren naar voren berekend. Om geen back tracking te hoeven toepassen, **moet** er voor het if-filter een trap zitten die 'een IP3 heeft'. Dat moet dus een versterker of actieve mixer zijn. Aangezien daar praktisch altijd een versterker zit, al is het alleen maar voor de aanpassing van 50 naar bv. 500 Ω, zetten we daar een versterker neer **die niet te wijzigen is** (de parameters uiteraard wel). Bovendien kan het IIP3 dan zonder trucs tot aan het begin berekend worden, ook als de eerste trap(pen) een verzwakker of bandfilter is/zijn.

Het ruisgetal moet ook van achteren naar voren berekend worden, zodat voor het if-filter een versterker of actieve mixer moet zitten om bovenvernoemde reden. We houden het op een versterker. Het IIP3 van verzwakkers en band pass filters, inclusief het if-filter, wordt impliciet op 100 dBm gesteld.

Ergo: De laatste trap wordt de if-versterker de voorlaatste het if-filter en de trap dáárvoor is een versterker. Het ruisgetal van de if-versterker moet dus in het wijzigingsalgoritme opgenomen worden.

We zullen het bovenstaande ding eens met de hand doorrekenen:

Gain

De gain in dB's wordt van voren naar achteren opgeteld en per trap opgeslagen in een reken-array. Dat wordt dus:

$$G_{i_1} = 0, G_{i_2} = 0 + G_1, G_{i_3} = 0 + G_1 + G_2, G_{i_k} = 0 + G_1 + G_2 + \dots + G_{k-1}, \text{ of}$$

$$\forall_i = (G_{\text{tot}} = 0 + G_{i-1} \text{ :: } 0 < i \leq k) \wedge G_{1..k} < 50$$

Default: G = 0 dB en derhalve: $G_f = 10^G/10 = 1$.

IP3

Voor drie trappen geldt: $1/OIP3 = 1/OIP3_1 \cdot G_2 \cdot G_3 + 1/OIP3_2 \cdot G_3 + 1/OIP3_3$

Voor twee dus: $1/OIP3 = 1/OIP3_1 \cdot G_2 + 1/OIP3_2$

of:

$$OIP3 = OIP3_1 \cdot G_2 \cdot OIP3_2 / (OIP3_1 \cdot G_2 + OIP3_2) \wedge OIP3 > 0 \wedge G > 0$$

Het gaat hier om de *factoren!*

Denk er om dat de gevonden OIP3 het uitgangs-IP3 *van beide trappen* is, zodat:

$$IIP3_f = OIP3_f / G_{f_1} / G_{f_2}$$

We kunnen beter eerst het gevonden OIP3 omzetten naar OIP3 in dB's en er dan G_1 en G_2 van aftrekken.

Noise

De ingangs-noise *factor* moet van voren af berekend worden, immers:

$$\text{voor drie trappen geldt: } F = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 \cdot G_2$$

$$\text{Voor twee dus: } F = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 \wedge G > 0 \wedge F \geq 1$$

Dynamic range

$$D = 2(IIP3 - NF_{\text{abs}})/3 \text{ ..(dB)}$$

$$NF_{\text{abs}} = N_{\text{floor}} + NF \text{ ...(dBm)}$$

$$N_{\text{floor}} = -174 + 10 \cdot \log B \text{ ...(dBm)}$$

$$\text{Ergo: } D = 2 (IIP3 - (-174 + 10 \log B) + NF) / 3$$

$$\text{of } D = 2 (IIP3 + 174 - 10 \log B - NF) / 3 \text{ ...(dB)}$$

Ingang trap 10, de if-versterker

$$NF[10] = 6 \text{ dB}$$

Ingang trap 9, het if-filter

Deze wordt gelijk aan het OIP3 van trap 8:

$$OIP3[8] = IIP3_8 + G_8 = 30 + 10 = 40 \text{ dBm}$$

$$NF[9] = NF[10] - G_9 = 6 + 4 = 10 \text{ dB.}$$

$$\begin{aligned} D[9] &= 2 (40 + 174 - 10\log(2400) - 10)/3 \\ &= 2 (40 + 174 - 33,8 - 10)/3 \\ &= 113 \text{ dB} \end{aligned}$$

Ingang trap 8

NF[8]:

$$\begin{aligned} F[8] &= F_8 + (F_9 - 1)/G_8 \\ &= 10^{0,4} + (10^1 - 1)/10^1 \\ &= 2,51 + 9/10 \\ &= 3,41 \end{aligned}$$

$$NF[8] = 10 \cdot \log 3,41 = 5,32 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} D[8] &= 2 (IIP3 + 174 - 10\log B - NF)/3 \dots(\text{dB}) \\ &= 2 (30 + 174 - 10\log B - 5,32)/3 \\ &= 2 (30 + 174 - 33,8 - 5,32)/3 \\ &= 109,9 \text{ dB} \end{aligned}$$

Ingang trap 7

$$OIP3[7] = IIP3_7 + G_7 = 14 - 6 = 8 \text{ dBm}$$

$$\begin{aligned} OIP3f[7] &= OIP3_7 \cdot G_8 \cdot OIP3_8 / (OIP3_7 \cdot G_8 + OIP3_8) \\ &= 10^{8/10} \cdot 10 \cdot 10^{40/10} / (10^{8/10} \cdot 10 + 10^4) \\ &= 10^{0,8} \cdot 10^5 / 10^{1,8} + 10^4 \\ &= 6,31 \cdot 10^5 / 63,1 + 10^4 \\ &= 631 \cdot 10^3 / 10063,1 = 62,7 \end{aligned}$$

$$OIP3[7] = 10 \cdot \log 62,7 = 17,97 \text{ dBm}$$

$$IIP3[7] = 17,97 - G_7 - G_8 = 7,97 + 6 - 10 = 13,97 \text{ dBm}$$

$$NF[7] = NF_8 - G_7 = 5 + 6 = 11 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} D[7] &= 2 (IIP3 + 174 - 10\log B - NF)/3 \dots(\text{dB}) \\ &= 2 (14 + 174 - 33,8 - 11)/3 \\ &= 95,5 \text{ dB} \end{aligned}$$

Ingang trap 6

OIP3[6]:

$$\begin{aligned}1/\text{OIP3}[6] &= 1/\text{OIP3}_6 \cdot G_7 \cdot G_8 + 1/\text{OIP3}_7 \cdot G_8 + 1/\text{OIP3}_8 \\&= 1/10^{3,1} \cdot 10^{-0,6} \cdot 10 + 1/10^{0,8} \cdot 10 + 1/10^4 \\&= 1/10^{3,5} + 1/10^{1,8} + 1/10^4 \\&= 10^{-3,5} + 10^{-1,8} + 10^{-4} \\&= 3,16 \cdot 10^{-4} + 158 \cdot 10^{-4} + 10^{-4} \\&= 162,56 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\text{OIP3}[6] = 10(\log 10^4 - \log 162,56) = 10(4 - 2,21) = 17,9 \text{ dBm}$$

$$\text{IIP3}[6] = 17,9 - 10 + 6 - 6 = 7,9 \text{ dBm}$$

NF[6]:

$$\begin{aligned}F[6] &= F_6 + (F_7 - 1)/G_6 + (F_8 - 1) \cdot G_6 \cdot G_7 \\&= 10^{0,5} + (10^0 - 1)G_6 + (10^{0,4} - 1) \cdot 10^{0,6} \cdot 10^{-0,6} \\&= 10^{0,5} + 10^{0,4} - 1 \\&= 3,1622 + 2,512 - 1 \\&= 5,13\end{aligned}$$

$$\text{FN}[6] = 10 \cdot \log 5,13 = 7,9 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned}D[6] &= 2 (\text{IIP3} + 174 - 10 \log B - \text{NF})/3 \\&= 2 (4 + 174 - 33,8 - 7,9)/3 \\&= 90,9 \text{ dB}\end{aligned}$$

Ingang trap 5

$$\text{NF}[5] = 7,9 + 3 = 10,9 \text{ dB}$$

$$\text{IIP3}[5] = 4 + 3 = 7 \text{ dBm}$$

$$D[5] = 91 \text{ dBm}$$

Ingang trap 4

$$\text{NF}[4] = 10,9 + 2 = 12,9$$

$$\text{IIP3}[4] = 7 + 2 = 9 \text{ dBm}$$

$$D[4] = 91 \text{ dBm}$$

Ingang trap 3