

Unterschiede zwischen analogen- und direktabtastenden Empfängern

Ein Icom IC-7610 oder Yaesu FTDX10 sind ähnliche HF-Transceiver und lassen sich auch ähnlich bedienen, intern sind sie aber völlig unterschiedlich aufgebaut. Der IC-7610 arbeitet als digitaler, direkt-abtastender SDR mit einem A/D-Wandler im HF-Eingang, der FTDX10 hingegen als analoger Empfänger mit einem analogen Mischer im HF-Eingang.

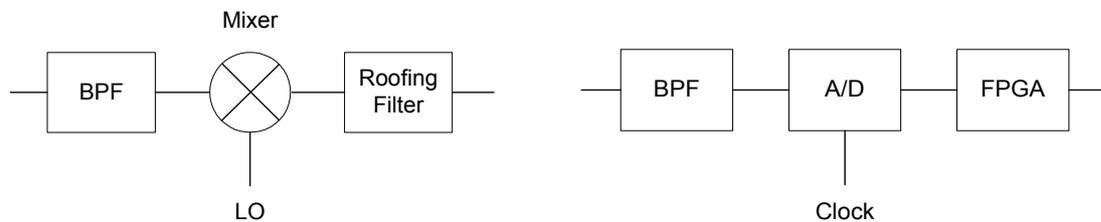


Bild 1: Prinzip analoger- und digitaler, direktabtastender Empfänger

In den Werbeanzeigen des FTDX10 informiert Yaesu zunächst über die wesentlichen Fakten des Empfängers: RMDR = 116dB, BDR = 141dB und 3.IMDR = 109dB. Mit 3.IMDR meint der Hersteller die Intermodulationsfestigkeit 3. Ordnung, also den verzerrungsfreien Dynamikbereich, mit BDR den maximalen Pegel, den ein starkes Signal neben einem kleinen Empfangssignal haben darf, ohne es zu blockieren und mit RMDR, ab wann ein starkes Signal ein kleines Signal durch Seitenbandrauschen zudeckt. Im Prinzip sind das die wichtigsten Kennwerte eines jeden analogen Empfängers.

Die Fakten

- 2 kHz RMDR 116 dB+
- 2 kHz BDR 141 dB+
- 2 kHz 3. IMDR 109 dB+

Ultimative Leistungsmerkmale für KW und 50 MHz

- 5-Zoll-TFT-Farb-Touch-Display mit 3DSS-Darstellung
- Mehrzweck-Wahlring (hinter dem VFO-Knopf) für beste Bedienbarkeit
- Fernsteuerung über LAN* oder Internet *(mit optionalem LAN-Modul)

KW/50-MHz-TRANSCEIVER
FTDX10

Klassenbeste RMDR-Performance und schnelleres Echtzeit-Spektrumkop mit noch höherer Auflösung

Features

- Innovatives HF-Direktabtast-System
- Erstaunliche 110 dB* RMDR
- Zwei unabhängige, völlig gleichwertige Empfänger

Bild 2: Werbeseiten des FTDX10 und IC-7610

Schaut man hingegen in ein Prospekt des digitalen IC-7610 und sucht dort nach dem 3rd. IMDR, BDR oder Dynamic-Range, wird man nicht fündig. Das einzige was man dort findet, ist die Angabe eines "Klassenbesten RMDR".

Woran liegt das? Warum wird bei digitalen Empfängern weder ein „3rd IMDR“, "BDR" noch ein „IP3“ angegeben? Wie soll man die beiden Empfänger denn jetzt miteinander vergleichen?

Nachfolgend versuche ich diese Fragen zu beantworten, indem ich die wesentlichen Unterschiede von analogen- und digitalen Empfängern anhand von Messbeispielen erkläre, sowie auf mögliche Fehler in Veröffentlichungen aufmerksam zu machen.

Empfindlichkeit (MDS)

Die Empfindlichkeit (MDS) ist eine wichtige Kenngröße des Empfängers, weil sie als Berechnungsgrundlage für viele andere Messungen dient. Als Maß der Empfindlichkeit, ist bei analogen- und digitalen Empfängern das Grundrauschen des Empfängers definiert. Zur Ermittlung des Rauschpegels legt man ein HF-Signal bei z.B. 14.1MHz an den Eingang des Empfängers ($B=500\text{Hz}$, CW) und gleicht den Empfänger auf einen Überlagerungston von ca. 600Hz ab. Dann reduziert man das HF-Signal soweit, bis sich am NF-Ausgang des Empfängers nur noch ein Rauschanstieg von $(S+N)/N = 3\text{dB}$ ergibt (**Bild 3**). Wird das erreicht, entspricht der eingespeiste Pegel dem Grundrauschen (MDS) des Empfängers, von z.B.

MDS = $-130\text{dBm}/500\text{Hz}$.

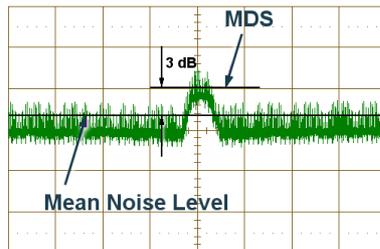


Bild 3: Messung des Empfänger Grundrauschens (MDS) über $(S+N)/N=3\text{dB}$

Das Rauschen wird mit Hilfe eines AC-Voltmeters (Ueff) am NF-Ausgang des Empfängers gemessen, wobei ein Anstieg von 3dB einer Spannungserhöhung um Faktor 1,414 ($20\lg U_2/U_1=3\text{dB}$) entspricht. Am besten eignet sich dafür ein Zeiger-Instrument, wenn möglich mit einer dB-Skala ($-10 \dots +20\text{dB}$), welches das aufgrund seiner Trägheit (Mittelung des Zeigerbewegung), das Rauschen stets als ein konstantes Spannungssignal anzeigt. Nach der Gleichung $P_N = k \times t_0 \times B$ ist die Rauschleistung (P_N) bei konstanter Temperatur (t_0) direkt abhängig von der Messbandbreite (B). Deswegen muss bei Angabe des MDS, stets die verwendete Bandbreite (genauer Rauschbandbreite) des Empfängers mit angegeben werden, also in dBm/Hz , im Beispiel $-130\text{dBm}/500\text{Hz}$ Bandbreite.

Reziprokes Mischen und Seitenbandrauschen (RMDR und SBN)

Zur Ermittlung des RMDR und SBN an analogen- und digitalen Empfängern, verwendet man den gleichen Messaufbau wie zur Empfindlichkeitsmessung und setzt wieder die "3dB-Methode" ein. Der einzige Unterschied zur Empfindlichkeitsmessung ist jetzt, dass jetzt ein sehr rauscharmes Testsignal verwendet werden muss. Das Seitenbandrauschen des verwendeten Testsignals muss im Abstand von 1 bis 2kHz um mindestens 10dB kleiner sein, als das Seitenbandrauschen des zu prüfenden Empfängers, ansonsten misst man das Seitenbandrauschen des Testoszillators und nicht das des Empfängers, denn reziprokes Mischen funktioniert (leider) in beide Richtungen.

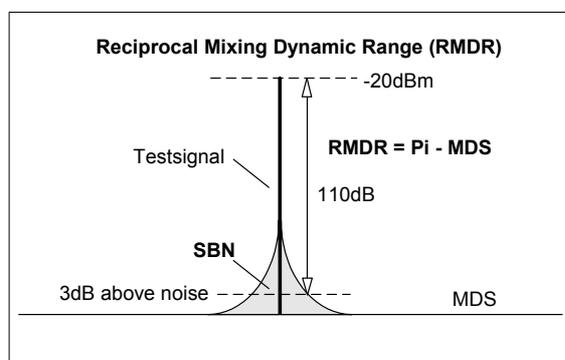


Bild 4: Ermittlung des Empfänger-RMDR mit einem rauscharmen Testsignal

Ausgehend von $P_i=-140\text{dBm}$ wird das Testsignal soweit erhöht, bis das NF-Rauschen am Ausgang des

Empfängers im Abstand von 1 bis 2kHz zum Träger um 3dB ansteigt (**Bild 4**). Im Beispiel erfolgt das bei einem Pegel von -20dBm. Daraus berechnet sich der RMDR zu

$$\text{RMDR} = P_i - \text{MDS} = -20\text{dBm} - (-130\text{dBm}/500\text{Hz}) = 110\text{dB}$$

und das Seitenbandrauschen zu

$$\text{SBN} = \text{MDS} - P_i - 10\log B = -130\text{dBm} - (-15\text{dBm}) - 10\log 500\text{Hz} = -118\text{dBm}/\text{Hz}$$

Hinweis: Starkes SBN eines Empfängers, kann ein kleines Signal neben einem großen Signal „zudecken“ und so einen empfindlichen Empfänger taub machen. Das gleiche kann auch bei einer IMD3-Messung passieren, dass ein IMD3-Signal mit nur 3dB über Rauschen in 1...2kHz Abstand zu den Trägersignalen abgedeckt und mehr erkannt wird. Wenn das passiert, ist der RMDR für die Großsignalfestigkeit des Empfängers verantwortlich und nicht mehr die Intermodulation. Bei modernen Empfängern ist das SBN inzwischen aber so gering geworden, dass im Regelfall nur noch die Intermodulation 3. Ordnung für die erreichbare Dynamik des Empfängers verantwortlich ist. Auf keinen Fall dürfen RMDR, BDR und DR3 miteinander verwechselt werden, nur weil in allen Abkürzungen das Wort „Dynamic Range“ vorkommt. Sie beschreiben jeweils eine unterschiedliche Dynamik.

BDR (Blocking Dynamic Range)

Der BDR sagt aus, wie gut ein Empfänger kleine Signale neben sehr großen Signalen verarbeiten kann, ohne dass die Empfindlichkeit des Empfängers darunter leidet. Der maximale BDR ist dann erreicht, wenn ein Störsignal (f_1, P_1) so groß wird, dass ein kleines Nutzsignal (f_2, P_2) im Abstand von 2...20kHz um 1dB an Amplitude (S/N) verliert (**Bild 5**). Wird das erreicht, berechnet sich der Blocking Dynamic Range zu

$$\text{BDR} = \text{Blocking Level} - \text{MDS}$$

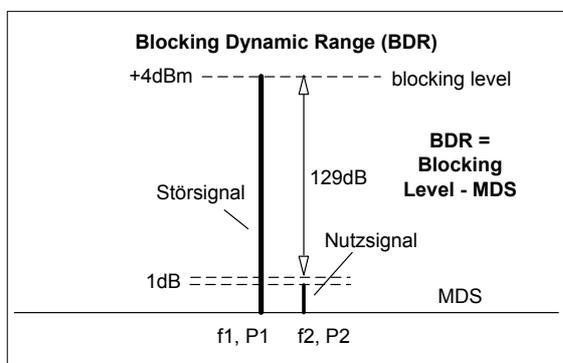


Bild 5: Blocking Dynamic Range eines analogen Empfängers

Auch bei der BDR-Messung, muss das SBN des verwendeten Störsignals sehr geringes sein. Falls nicht, wird das kleine Signal bereits vor dem Blocking des Empfängers vom Seitenbandrauschen des Störsignals zudeckt und das Messergebnis wird falsch (zu gering).

Das Ergebnis einer BDR-Messung an einem analogen Empfänger mit $\text{MDS} = -125\text{dBm}/500\text{Hz}$, gemessen über einen NF-Analysators am NF-Ausgang des Empfängers zeigt **Bild 6**. Erst wenn das Störsignal einen Pegel von +4dBm ($S_9+77\text{dB}$) erreicht hat, geht die Amplitude des kleinen Nutzsignals (P_2) im Abstand von 20kHz von -107dBm auf -106dBm zurück. Der Empfänger verliert also um 1dB an Empfindlichkeit und der daraus resultierende BDR beträgt

$$\text{BDR} = \text{Blocking Level} - \text{MDS} = +4\text{dBm} - (-125\text{dBm}/500\text{Hz}) = 129\text{dB}$$

Ein BDR lässt sich nur bei analogen Empfängern ermitteln, aber nicht bei digitalen Empfängern. Bei

analogen Empfängern entsteht das Blocking im 1. Mischer, ein A/D-Wandler kennt diesen Vorgang nicht! Ein ADC (Analog-Digital-Wandler) übersteuert (sättigt), lange bevor eine Blockierung auftritt.

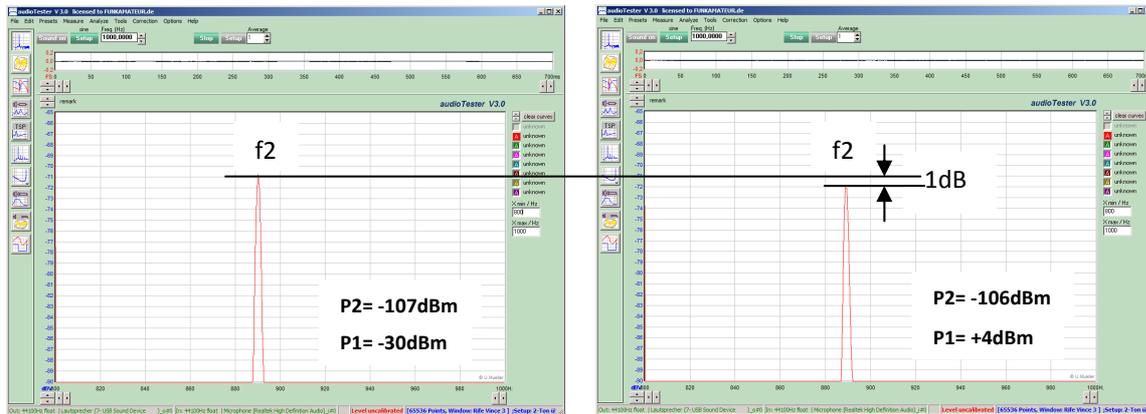


Bild 6: Bei einem Störsignal von +4dBm (rechts) gerät der analoge Empfänger in 1dB-Kompression

Versuche ich die gleiche Messung mit einem digitalen Empfänger durchzuführen, ist kein Verlust an Dynamik feststellbar. Selbst bei Vergrößerung des Störsignals (f1) bis kurz vor Clipping des SDRs bei -15dBm (-1dBFS), geht der Pegel des dicht benachbarten Nutzsignals nicht zurück, es verbleibt konstant bei -121dBm (**Bild 7**). Bei direktabtastenden SDR Receivern existiert kein Blocking, stattdessen nur ein Clipping.

Aus diesem Grund findet man in Datenblättern direktabtastender Empfänger, wie IC-7610, IC-705 IC-7300, ANAN-7000, FlexRadio-6400, usw., auch keine Angabe über einen „Blocking Dynamic Range“.

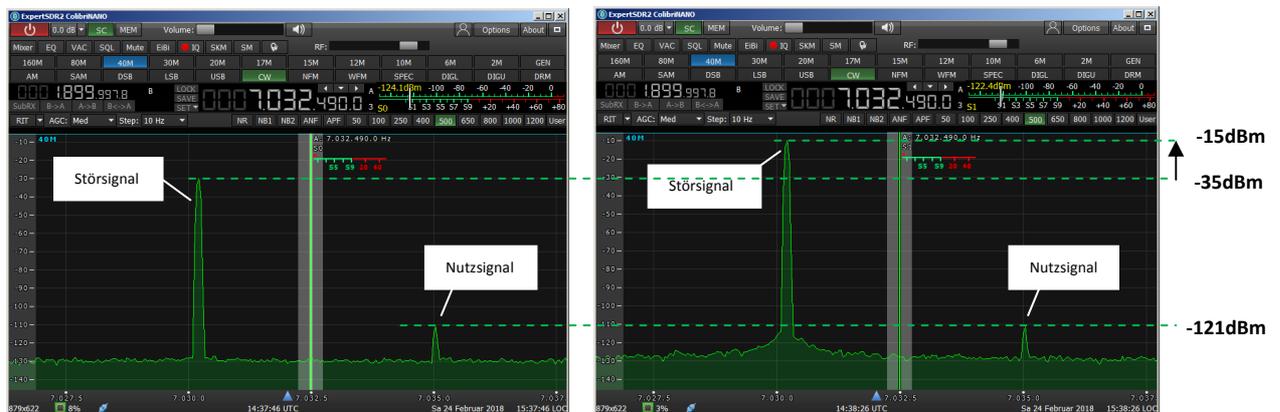


Bild 7: Direktabtastend-Empfänger zeigten bis hin zu ihrer Begrenzung (Clipping) kein Blocking!

Intermodulation 3. Ordnung (IMD3)

Weil das Intermodulationsverhalten von analogen- und digitalen Empfängern sehr unterschiedlich ist, beschreibe ich beide Messverfahren und deren Ergebnisse getrennt voneinander.

a) Intermodulation analoger Empfänger

Zur Ermittlung der IMD3-Festigkeit eines Empfängers, verwendet man standardmäßig ein HF 2-Ton Signal (**Bild 8**). Zwei gleich große HF-Signale, die in geringem Frequenzabstand zueinander stehen, (analog: 20kHz, digital: 2kHz) werden auf den Eingang des Empfängers gegeben und deren Pegel so weit erhöht, bis die unerwünschten IMD3-Störungen bei $2f_1 - f_2$ und $2f_2 - f_1$ das Grundrauschen des Empfängers mit $(S+N)/N=3\text{dB}$ erreichen. Die Differenz von Eingangspegel (P_i) zu Grundrauschen (MDS) ergibt dann den maximalen IMD3-freien Dynamikumfang (DR_3 , Dynamic Range 3rd Order) des Empfängers.

Zum Beispiel: $DR_3 \text{ max} = P_i \text{ max} - \text{MDS} = -25\text{dBm} - 130\text{dBm}/500\text{Hz} = 105\text{dB}$

Dieser Wert, von z.B. 105dB, wird von den Herstellern als „Dynamic Range“ oder „3rd IMDR“ im Datenblatt des analogen Empfängers stolz angegeben, meist schon auf der ersten Seite.

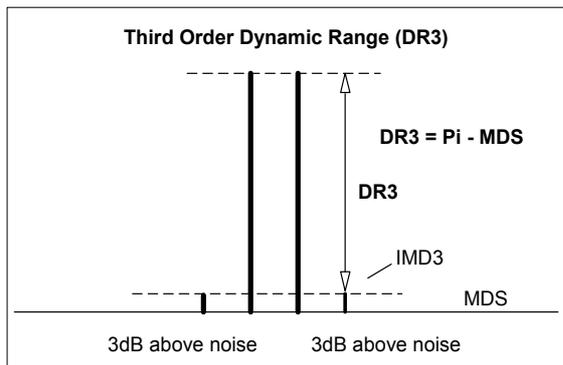


Bild 8: Messung der Intermodulation mit einem 2-Ton Signal

Der Intermodulationsverlauf eines analogen Empfängers wird in **Bild 9** über einen Pegelbereich (P_i) von -130 bis +30dBm wiedergegeben. Die maximale Dynamik des Empfängers entsteht dann, wenn die IMD3 das Grundrauschen des Empfängers erreicht hat (roter Punkt), im Beispiel bei $P_i = -25$ dBm und berechnet sich an dieser Stelle zu $DR3 = P_i - MDS = 105$ dB. Vergrößert oder verkleinert man die Aussteuerung, verliert der Empfänger in beiden Fällen an Dynamik. Ich erwähne das deswegen so explizit, weil sich digitale Empfänger hier völlig anders verhalten, wie noch gezeigt wird.

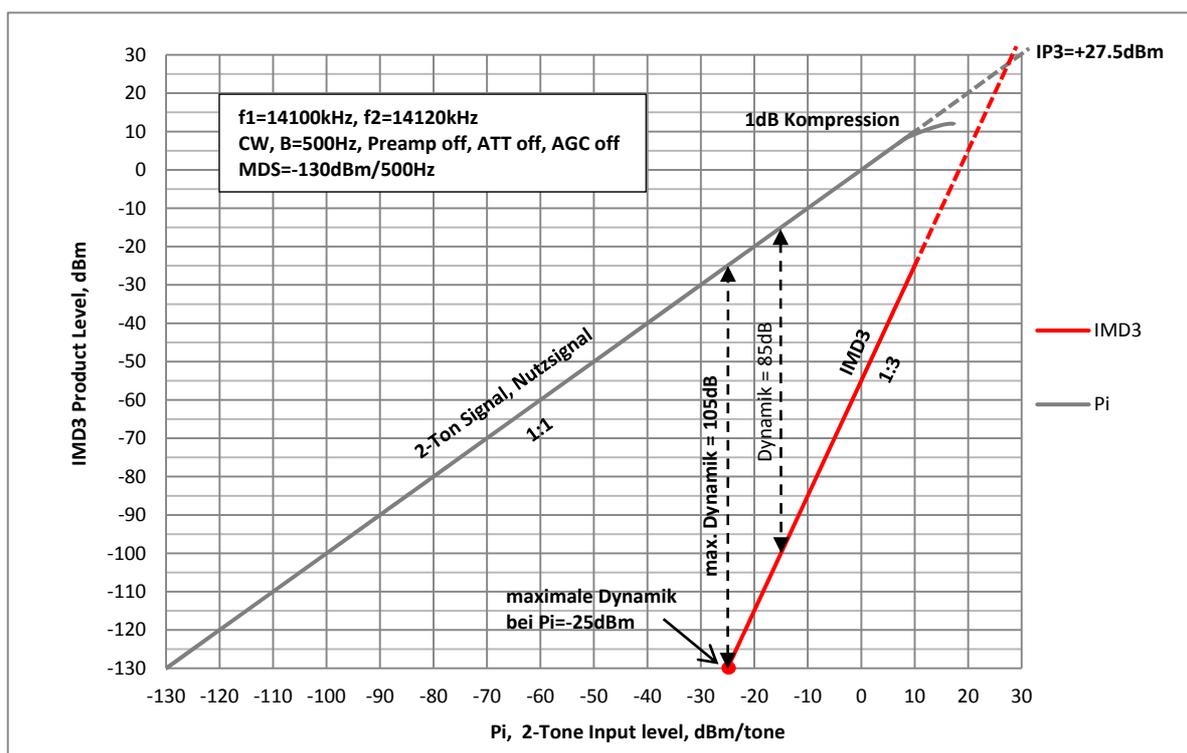


Bild 9: IMD3-Verlauf eines analogen Empfängers

Wird das Signal z.B. um 10dB erhöht, steigen die Intermodulationsprodukte um 30dB an, von -130dBm auf -100dBm und die Dynamik verkleinert sich um 20dB von 105dB auf 85dB. Demnach wachsen die IM3-Produkte drei Mal so schnell an, wie die Nutzsignale und treffen sich theoretisch in einem Schnittpunkt, der als „Intercept-Point 3rd Order“ (IP3) bezeichnet wird. Wird ein IP3, wie im Beispiel von + 27,5dBm erreicht, ist das ein guter Wert und der Anwender weiß, dass er einen großsignalfesten Empfänger besitzt.

Weil P_i und IMD3 in einem festen Verhältnis von 1:3 zueinander stehen, lassen sich darüber die wichtigsten Kenngrößen des Empfängers sehr einfach berechnen, wie

- $IP3 = DR3/2 + P_i = 107\text{dB}/2 - 23\text{dBm} = +27,5\text{dBm}$
- $P_i \text{ max} = 1/3 \times (2 \times IP3 + \text{MDS}) = 1/3 (55 - 130) = -25\text{dBm}$
- $DR3 \text{ max} = P_i - \text{MDS} = -25\text{dBm} - (-130\text{dBm}) = 105\text{dB}$
- $\text{MDS} = 3 \times P_i - 2 \times IP3 = -75\text{dBm} - 55\text{dBm} = -130\text{dBm}$

Eine Begrenzung erfolgt erfolgte erst relativ spät und langsam, bei etwa +10dBm. Zuvor erzeugt der Empfänger zwar schon kräftig Intermodulation, ist aber bis kurz vor seiner Begrenzung noch nutzbar. Befinden sich vor dem 1. Mischer Bandpaßfilter und/oder HF-Vorverstärker, können diese den IMD3-Verlauf unter Umständen negativ beeinflussen, was beachtet werden muss.

Hinweis zum 2-Ton Generator: Ähnlich wie bei der RMDR- und BDR-Messung, muss das SBN beider Generatoren sehr gering sein, damit IMD3-Signale mit nur 3dB über Rauschen nicht vom SBN der Generatoren zugedeckt werden. Bei 20kHz Abstand spielt das SBN oft noch keine Rolle, bei 2kHz Abstand aber schon. Weiterhin muss der Eigen-IMD3-Abstand des 2-Ton Generators bei einem $P_i=2 \times 20\text{dBm}$ mindestens 110dBC betragen, d.h. die selbst erzeugten IMD3-Produkte dürfen nicht oberhalb von -130dBm liegen. Ist der Abstand geringer, besteht die Gefahr, dass nicht die IMD3 des Empfängers gemessen wird, sondern die IMD3 des 2-Ton Generators und die Messergebnisse werden falsch.

b) Intermodulation direktabtastender Empfänger (SDR Receiver)

Ganz anders verläuft die IMD3 bei digitalen, direktabtastenden SDRs. Zur Prüfung wird ebenfalls ein 2-Ton Signal verwendet. Ein idealer ADC im Eingang eines Empfängers, erzeugt theoretisch bis hin zu seiner Sättigung überhaupt keine Intermodulation. Tatsächlich erzeugt er aber Intermodulation über dem Grundrauschen des Empfängers, die aufgrund seiner Quantisierungsfehler mehr oder weniger starke ausfallen kann. **Bild 10** zeigt die unterschiedlichen IMD3-Verläufe von drei verschiedenen digitalen Empfängern, dem IC-705, IC-7300 und ColibriNano, als auch die IMD3-Kurve eines analogen Empfängers, in einem gemeinsamen Diagramm.

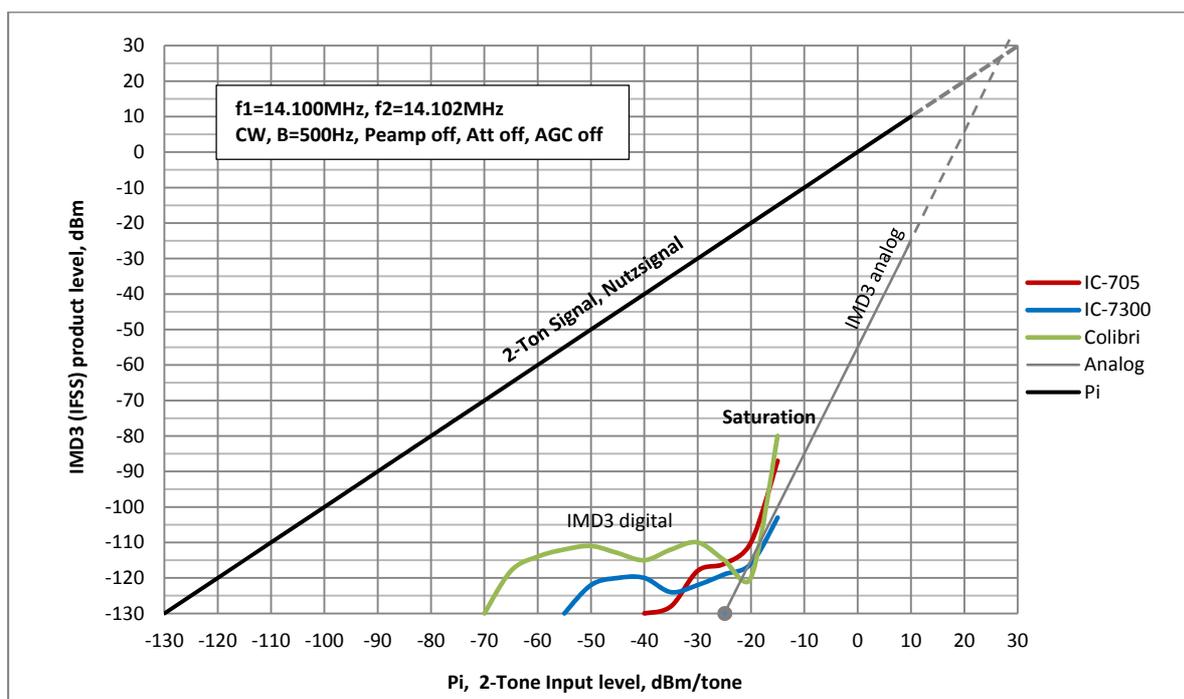


Bild 10: IMD3-Verlauf direktabtastender Empfänger (grün, rot, blau) und eines analogen Empfängers (grau)

Zunächst fällt auf, dass die ersten Störprodukte bei den digitalen Empfängern schon relativ früh entstehen, bei $P_i = -70\text{dBm}$ (ColibriNANO), -55dBm (IC-7300) und -40dBm (IC-705). Vergrößert man die Eingangssignale, steigen die Kurven jedoch nicht mit Faktor 1:3 an, sondern verlaufen in einer relativ flachen, welligen Form bis hin zu ihrer Begrenzung (Clipping) bei ca. -20dBm . Da die IMD3-Kurven offensichtlich keiner Gesetzmäßigkeit folgen, können auch keinerlei Berechnungen mehr durchgeführt werden, wie z.B. der maximalen, verzerrungsfreien Dynamik oder des größten Eingangspegels für maximale Dynamik. Demnach kann auch kein IP_3 mehr ermittelt werden, für direct-sampling SDR Receiver ist ein IP_3 nicht existent.

Die größte Dynamik erreichen digitale Empfänger - im Gegensatz zu analogen Empfängern - erst bei maximaler Aussteuerung ihres ADC, kurz vor Begrenzung (-1dBFS , Full Scale), im sog. Sweet-Spot. Zur Beurteilung der Qualität direktabtastender Empfänger gilt: Je später die ersten IMD3-Produkte im Rauschen des Empfängers erscheint und je tiefer und flacher die IMD3-Kurve bis hin zum Clipping verläuft, umso besser ist der Empfänger!

Zur Verdeutlichung, zeigt **Bild 11** den Dynamikverlauf des IC-7300. Die Dynamik (DR3) entlang der IMD3-Kurve wurde in 10dB -Abständen berechnet ($DR_3 = P_i - \text{IMD}_3$) und in den roten Zahlen mit eingeblendet. Erst jetzt wird deutlich erkennbar, in welchem Maß sich die Dynamik des IC-7300 mit wachsender Aussteuerung vergrößern aber auch verkleinern kann, beginnend bei 74dB beim den ersten IMD3-Produkt mit 3dB über dem Rauschen, bis hin zu 98dB kurz vor Saturation (Clipping).

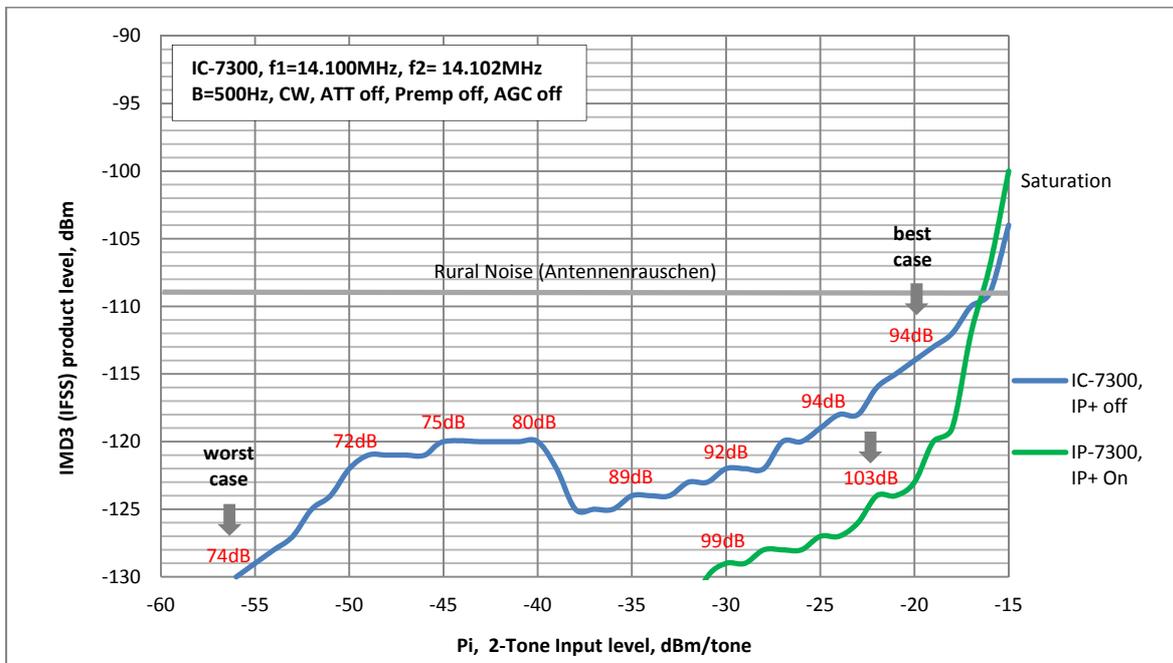


Bild 11: Intermodulationsverlauf des IC-7300, IMD3-Werte (Dynamik) in roten Zahlen



Bild 12: 2-Ton Signal ohne (links) und mit Dithering (IP+) (rechts)

Wird jetzt noch die Dither-Funktion "IP+" des IC-7300 aktiviert (grüne Kurve), verschwinden fast alle

IMD3-Störprodukte - die in Wirklichkeit ja gar nicht existieren! - und die verzerrungsfreie Dynamik beträgt jetzt bis zu 103dB. Durch Hinzufügen von weißem Rauschen in den Eingang eines A/D-Wandlers „Verwischen“ dessen Quantisierungsfehler und die Dynamik erreicht fast die gleichen Werte, wie die eines großsignalfesten, analogen Empfängers (**Bild 12**).

Welche „Dynamik“ sollte ICOM im Datenblatt des IC-7300 jetzt angeben? 74dB, 72dB, 75dB, 80dB, 89dB, 92dB, 94dB oder 103dB? Wie die Kurve in **Bild 11** deutlich zeigt, lässt sich die Dynamik direktabtastender Empfänger - im Gegensatz zu analogen Empfängern - mit einem einzigen "dB-Wert" nicht mehr benennen. Eventuell könnte man den "worst case" von 74dB oder den "best case" von 94dB oder 103dB angeben oder irgendeinen Wert dazwischen, aber das würde mehr verwirren als nutzen.

Ergebnis: Eine feste Dynamik, so wie bei analogen Empfängern üblich, gibt es bei digitalen Empfängern nicht. Aus diesem Grund fehlen in den Datenblättern direktabtastender Empfänger, wie IC-7300, IC-705, Perseus, ANAN7000 und FlexRadio6600 auch jegliche Angaben einer „Dynamik“ oder "3 rd IMDR".

Die einzige Möglichkeit, die Großsignalfestigkeit direktabtastender Empfänger zu zeigen, besteht in der Veröffentlichung ihrer IMD3-Kurven (**Bild 11**), so wie es z.B. Adam Farson schon seit Jahren in seinen "Receiver Test-Reports" macht (<https://www.ab4oj.com/test/reports.html>).

Ein anderer Weg die Dynamik zu klassifizieren, bietet das NPR-Verfahren (Noise Power Ratio), wo anstelle von zwei Sinus-Signalen ein weißes Rauschband in den Empfänger eingespeist wird und über ein Kerbfilter die maximale Aussteuerung des Empfängers ermittelt wird. Dieses Verfahren lässt sich bei allen Empfängern anwenden, egal ob analog, hybrid oder digital. Das wäre im Prinzip das einzige Verfahren, mit dem man eine Empfänger-Vergleichsliste bezüglich der Dynamik erstellen könnte. Das Messverfahren ist jedoch technisch aufwendig, so dass es sich wahrscheinlich nicht durchsetzen wird (https://www.ab4oj.com/test/docs/npr_test.pdf).

Die wichtigsten Unterschiede zwischen analogen- und digitalen Empfängern:

	analoger Empfänger	direct-sampling SDR Empfänger
Ermittlung eines IP3	ja	nein
Ermittlung eines IP2	Ja	ja
Ermittlung eines BDR	Ja	nein
Ermittlung eines RMDR und SBN	Ja	ja
Ermittlung der IMD3-Dynamik	Ja	nein
Ermittlung der maximalen Dynamik	bei kleinen Signalen	bei großen Signalen
Verbesserung der Dynamik	größeres LO-Signal einspeisen, besseren Mischer verwenden	höhere ADC-Auflösung (14->16Bit) Dither & Random verwenden
Entstehung einer Begrenzung	langsam, bei -1dB Kompression	schnell, Clipping bei >0dBFS
bester RMDR	mit geringem LO Phase-Noise	mit geringem Clock-Signal Jittern

Tabelle 1: Vergleich der Eigenschaften von analogen- und direktabtastenden Empfängern

Fehlerhafte Messungen

Wie in **Tabelle 1** gezeigt, lassen sich bei digitalen Empfängern nicht alle Spezifikationen messen oder berechnen, wie es bei analogen Empfängern geläufig ist. Bei digitalen Empfängern existieren z.B. kein IP3, kein Blocking (BDR) und keine fest definierbare IMD3-Dynamik. Beachtet man diese Unterschiede nicht, können fehlerhafte Aussagen entstehen.

Ein Beispiel ist die Empfänger-Vergleichsliste (<http://www.sherweng.com/table.html>) von Rob Sherwood. Bei den dort getesteten digitalen Empfängern (direct-sampling SDRs) stellt sich die Frage,

wie Rob deren "Blocking" und "Dynamic Range" ermittelt hat, denn beide Werte sind im Prinzip nur für analoge Empfänger anwendbar. Weil ein Blocking (**Bild 7**) bei digitalen Empfängern nicht existiert, verwendet Rob stattdessen den "ADC-Clipping-Level" (0dBFS) des Empfängers, obwohl beide Werte etwas anderes aussagen. Bei digitalen Empfängern, läßt sich ein äquivalenter "Dynamic Range" zu analogen Empfängern nicht festlegen. Wurde z.B. ein Dithering (IP+) aktiviert, kann sich die Dynamik um bis zu 10dB verbessern (**Bild 11**).

Die meisten Hersteller von direct-sampling SDRs haben diese Problematik inzwischen erkannt und geben in ihren Datenblättern weder ein "Blocking" noch einen "Dynamic Range" an, stattdessen nur ein "RMDR" (Reciprocal Mixing Dynamic Range).

Bild 13 zeigt den steigenden und fallenden DR3 des IC-705, über einen Bereich von 75 bis 98dB. Im Gegensatz zu analogen Empfängern, ist ein klassischer, fester DR3 nicht mehr spezifizierbar.

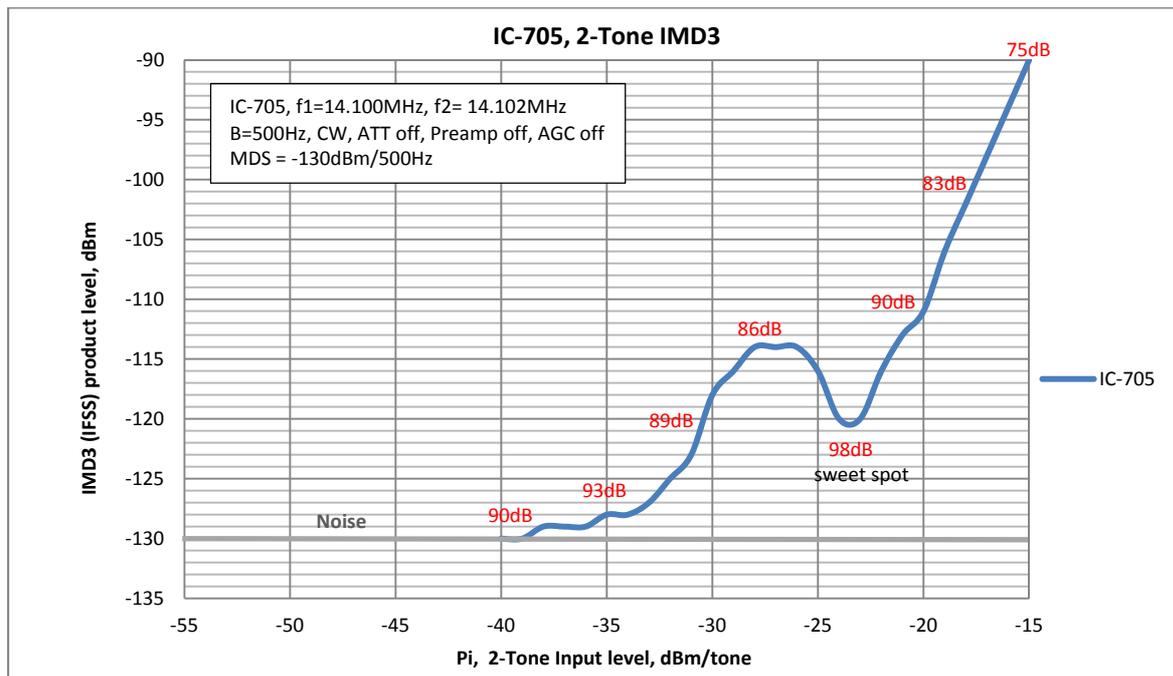


Bild 13: IFSS (Interference-Free Signal Strength) Kurve des IC-705 mit einem "DR3-Maximum" von 98dB

Werner Schnorrenberg

DC4KU

09.03.2021

Rev. 08.09.2022, 11.2022