


Jak dokonać pomiaru ENR pierwszego źródła szumów?

Paradoks jajka i kury...



Paweł Sujkowski SQ1GQC
IV Jesienne Warsztaty Mikrofalowe
Fojutowo 16-18.11.2018

1. Czym są szумы termiczne i dlaczego potrzebujemy je mierzyć.
2. Jakimi metodami mierzy się szумы.
3. Czym jest kalibrowane źródło szumów.
4. Metody wyznaczania ENR.
5. Zastosowana metoda i uzyskane wyniki.
6. Przydatna literatura.

Czym są szумы termiczne i dlaczego potrzebujemy je mierzyć

Określeniem szumu w technice radiowej określamy **przypadkowy** przebieg (random electrical waveform) mogący zakłócić pożądaną emisję i sygnał. Przypadkowa natura przebiegu sygnału szumowego oznacza, że nie zawiera tenże sygnał elementów o przewidywalnej częstotliwości oraz to, że jego amplituda nie jest przewidywalna w przyszłości. Przypadkowy szum posiada widmo będące ciągłą funkcją częstotliwości i nie zawiera dyskretnych prążków.

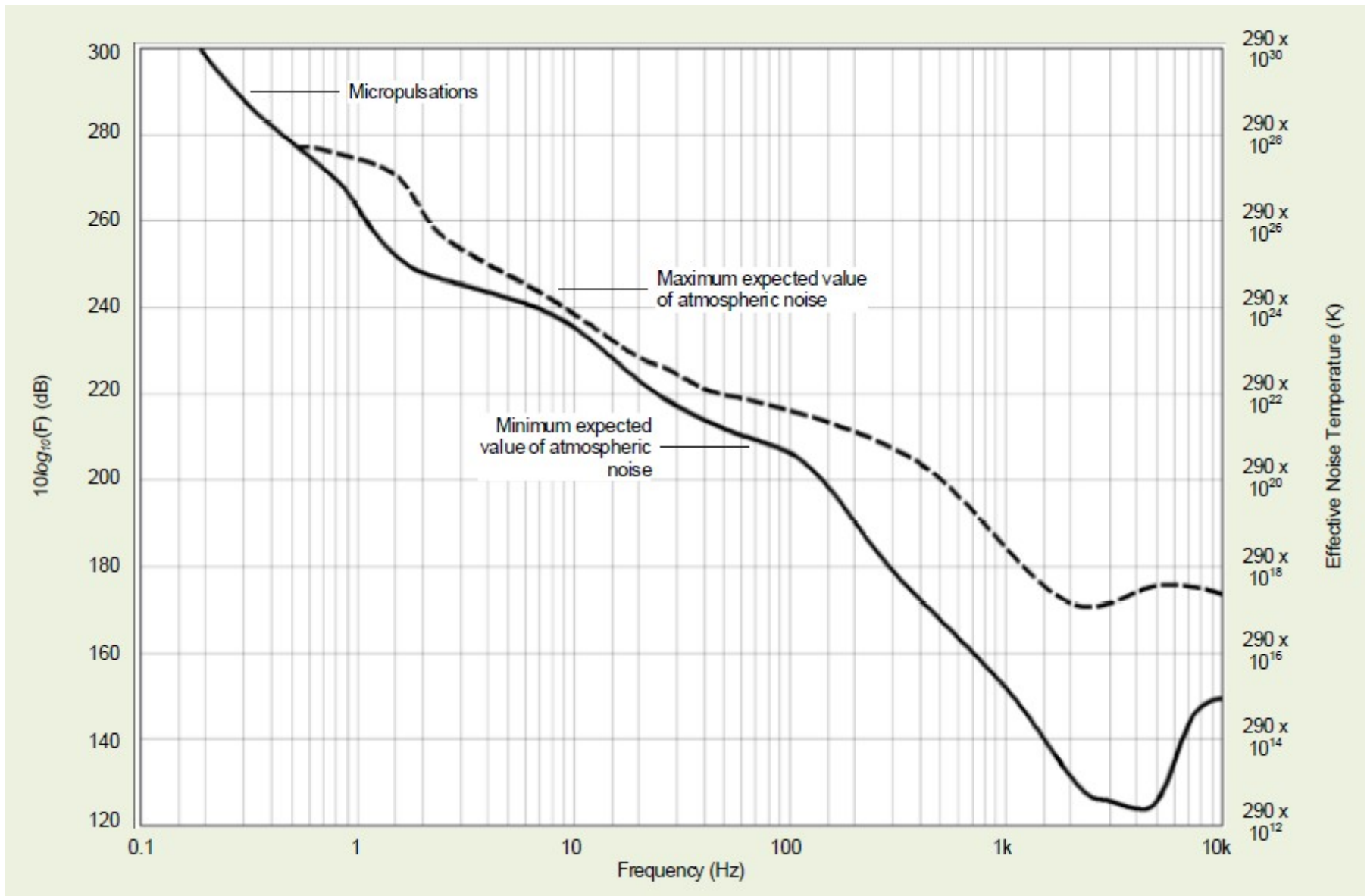
Interesującą nas w tym przypadku formą szumów są szумы termiczne, które swe źródło mają na poziomie molekularnym w ruchu cząstek a nazwę zawdzięczają zależności tego ruchu od temperatury.

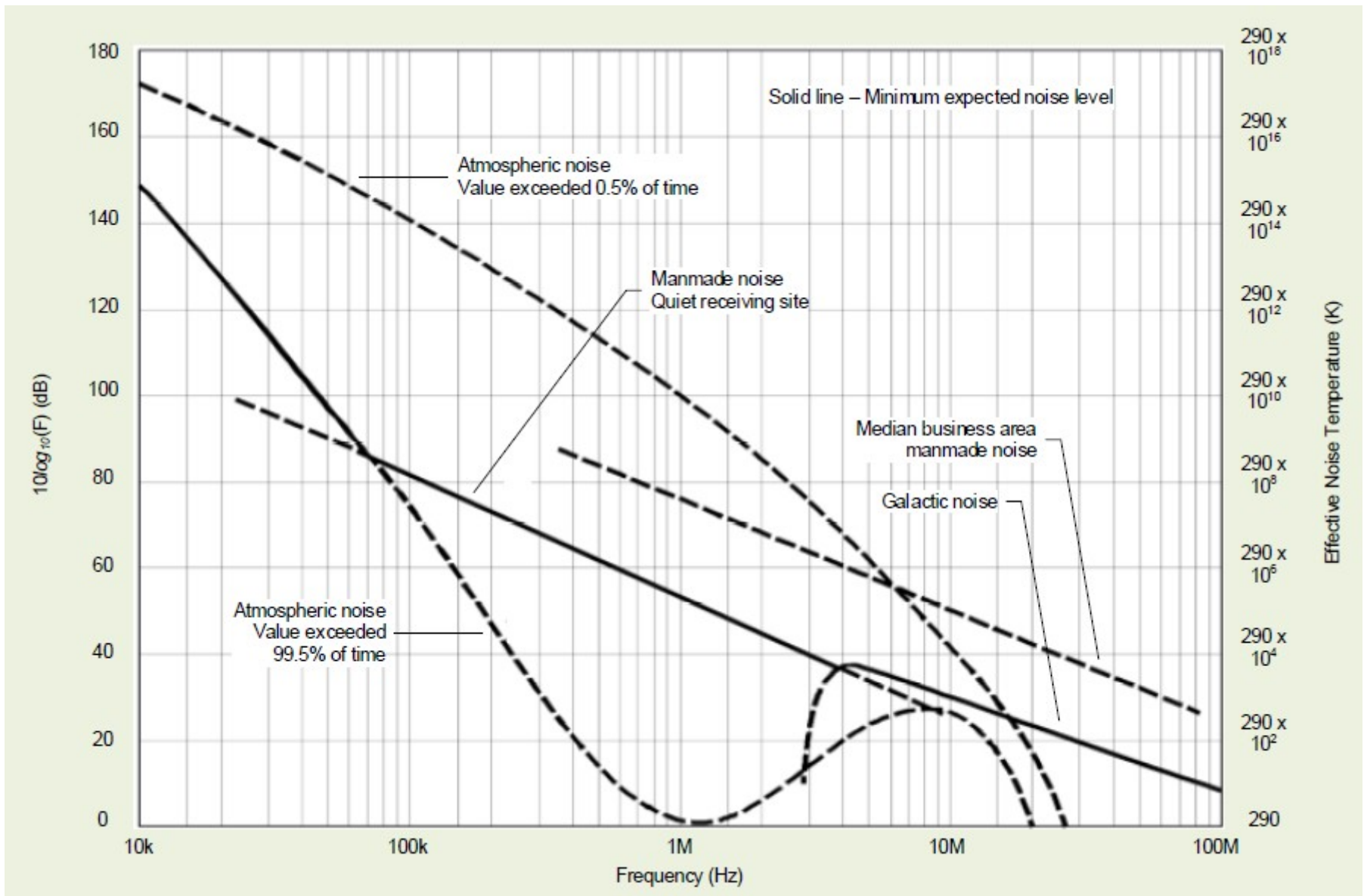
Czym są szумы termiczne i dlaczego potrzebujemy je mierzyć

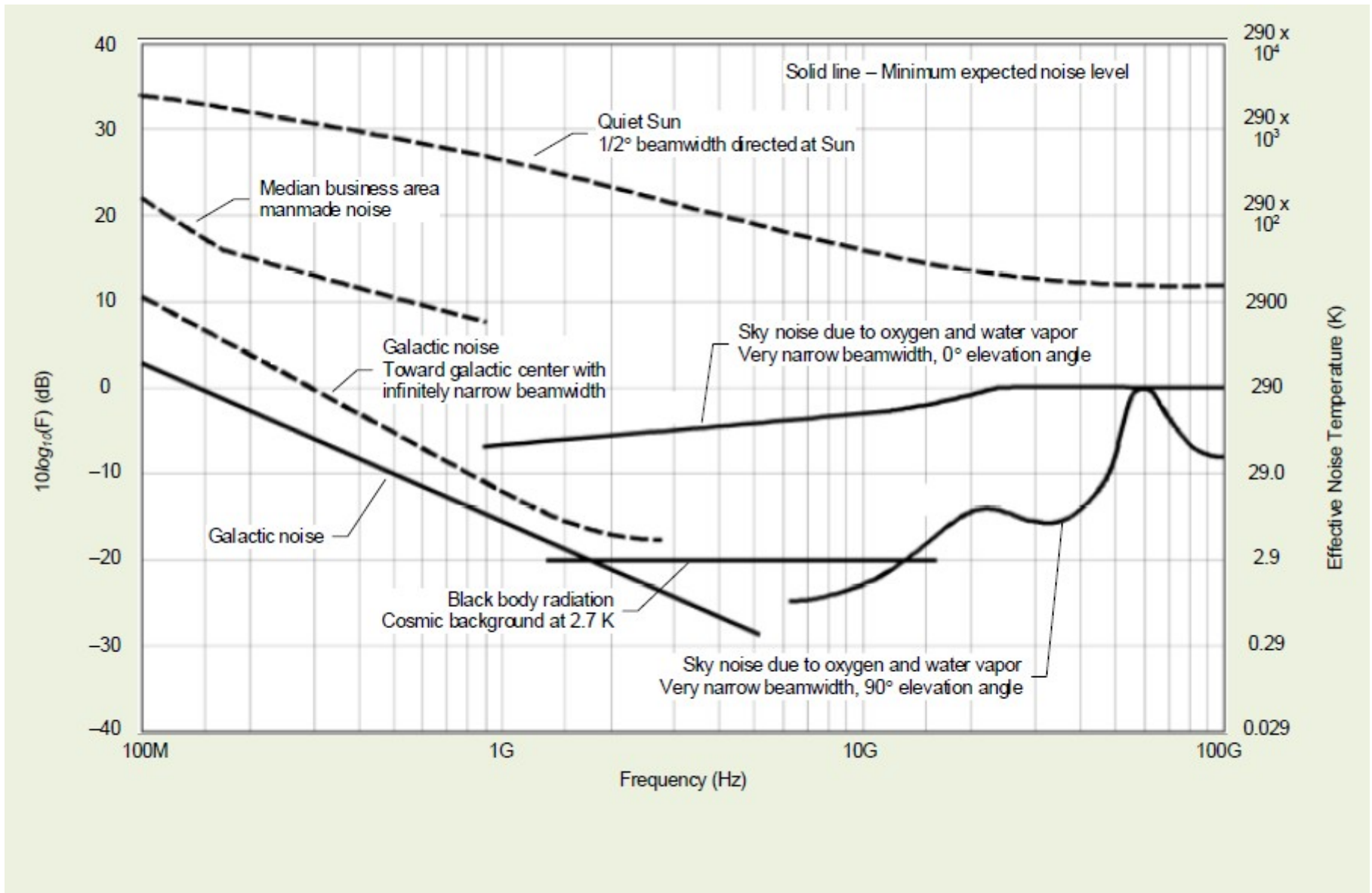
W interesującym nas przypadku łączności radiowej dwa główne źródła szumów wpływające na bilans łącza radiowego i możliwość nawiązania łączności, to szумы pochodzenia naturalnego i sztucznego dochodzące do naszej aparatury z zewnątrz, oraz szумы naszego urządzenia radiowego degradujące docierający sygnał użyteczny.

Poniższe wykresy przedstawiają szумы tła (naturalne i sztuczne) wyrażone w formie współczynnika szumów oraz temperatury szumów dla widma od 0,1 Hz do 100 GHz.

Wykresy dotyczą anteny izotropowej.







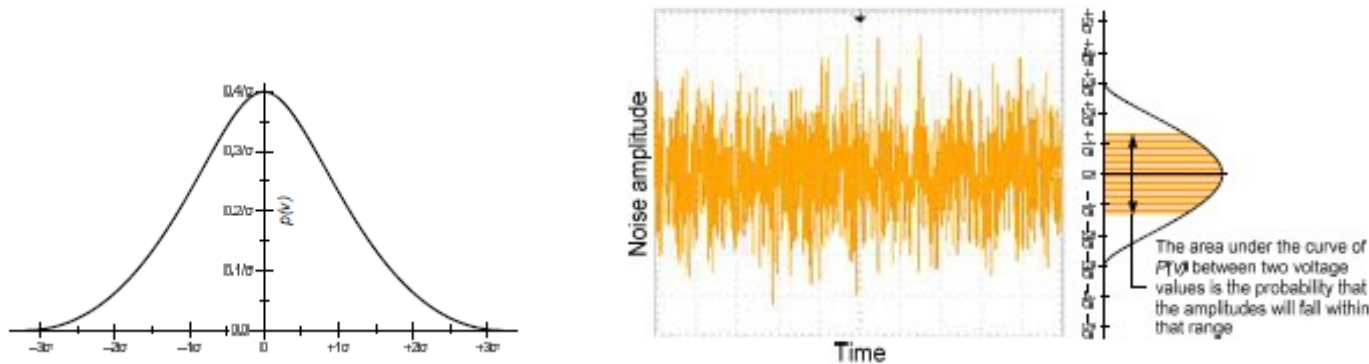
Czym są szумы termiczne i dlaczego potrzebujemy je mierzyć

Ponieważ jak zaznaczyłem uprzednio natura szumów jest przypadkowa, aparatem nadającym się do opisu ich właściwości jest statystyka. Pojedynczy pomiar wnosi niewiele, natomiast obrobiona statystycznie grupa pomiarów wykonana w skończonym czasie pozwala już w zadowalającej nas dokładności zmierzyć szумы. Dwa najważniejsze parametry szumów to amplituda (napięcie bądź moc) oraz widmo (dystrybucja w funkcji częstotliwości).

W technice radiowej przyjęło się dyskutować o szumach w odniesieniu do pasma 1 Hz, określając ten parametr mianem **gęstości widmowej szumów**.

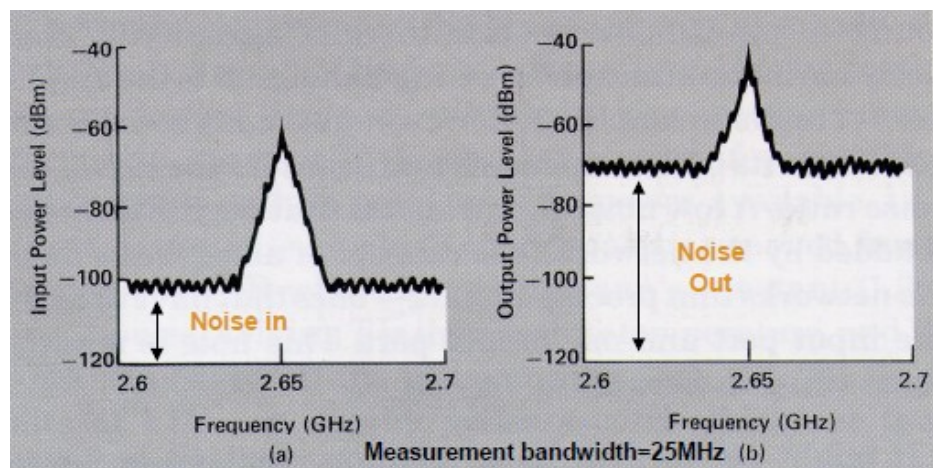
Czym są szумы termiczne i dlaczego potrzebujemy je mierzyć

Celem lepszego zrozumienia aparatu matematycznego stosowanego do opisu właściwości szumów warto zaznaczyć że statystyczna gęstość szumów zgodna jest z dystrybucją normalną czyli Gausowską (w 99% wartość RMS [root mean square] napięcia szumów mieści się w rozkładzie poniżej funkcji Gaussa).



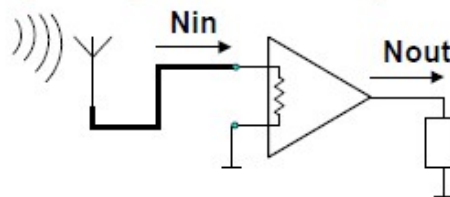
Czym są szумы termiczne i dlaczego potrzebujemy je mierzyć

Jeden obraz jest lepszy niż sto słów, więc na zakończenie wstępu przytoczę klasyczny obraz ilustrujący koncepcję szumów wzmacniacza.



a) C/N at amplifier input

b) C/N at amplifier output



Jakimi metodami mierzy się szumy

Najczęściej dotychczas stosowaną metodą jest metoda oparta na współczynniku Y z zastosowaniem kalibrowanego źródła szumów. Polega ona na pomiarze różnicy mocy szumów dla dwóch stanów źródła szumów: wyłączzonego i załączonego. Po szczegóły odsyłam do źródłowych not aplikacyjnych. Zastosowanie kalibrowanego źródła szumów ze znanym współczynnikiem ENR, zwalnia nas z obowiązku znania współczynnika szumów naszego sprzętu pomiarowego.

Jeśli posługujemy się miarą decybelową, współczynnik Y można wyrazić jako różnicę gęstości widmowej mocy szumów na wyjściu mierzonego obiektu dla źródła załączonego i wyłączzonego:

$$[1] \quad Y[\text{dB}] = P_{\text{HOT}}[\text{dBm/Hz}] - P_{\text{COLD}}[\text{dBm/Hz}]$$

Jakimi metodami mierzy się szumy

ENR jest skrótem pochodzącym od określenia:

Excess Noise Ratio (nadmiarowy współczynnik szumów?)

Definiowany jest jako różnica temperaturze szumów dla źródła załączonego i wyłączzonego. ENR opisuje syntetycznie właściwości źródła szumów dla danej częstotliwości.

$$[2] \text{ ENR[dB]} = 10 \log_{10} [(T_s^{\text{ON}} - T_s^{\text{OFF}})/T_0]$$

gdzie T_s^{ON} są temperaturami szumów dla źródła załączonego i wyłączzonego.

Jakimi metodami mierzy się szумы

Koncepcja temperatury szumów. Moc szumów jest proporcjonalna do temperatury.

$$[3] P_N = kTB$$

gdzie:

P_N – wyrażona w watach moc szumów

k – stała Boltzmannna $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T – temperatura wyrażona w Kelwinach

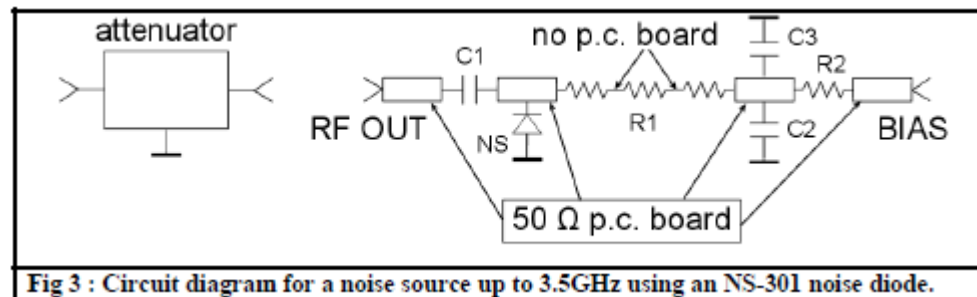
B – pasmo wyrażone w Hercach

Podając temperaturę szumów odnosimy się zastępczo do mocy szumów wynikającej z równania [3]

Czym jest kalibrowane źródło szumów

Współcześnie jako generatory szumów wykorzystywane są źródła diodowe. Produkowane są specjalizowane diody szumowe, charakteryzujące się określoną mocą i widmem szumów (oczywiście w zależności od temperatury). Można także wykorzystać zaporowo spolaryzowane złącze baza-emiter tranzystora bipolarnego.

Diode NS-303 specifications Frequency range: 10Hz - 8GHz (max. 10GHz) Output level: about 30dBENR Bias: 8 - 10mA (8 - 12V)	Case: Metal-ceramic gold plated Cathode 
--	--



Czym jest kalibrowane źródło szumów

Standardowo przyjętym napięciem polaryzacji źródeł szumów jest +28 V DC. Prądy polaryzacji w granicach kilku mA. Dioda jest zazwyczaj polaryzowana źródłem stałoprądowym. Poniżej przykładowe źródła szumów. Od lewej 2x DIY by SP1CNV oraz Keysight 346C K01.



Metody wyznaczania ENR

Chciałbym wspomnieć o dwóch metodach służących do wyznaczenia ENR nieznanego źródła szumów. Pierwszą z nich jest metoda porównawcza, którą kilkakrotnie stosowałem celem scharakteryzowania wykonanych przez kolegów źródeł szumów i weryfikacji źródeł fabrycznych. Polega ona na dokonaniu pomiaru przykładowego DUT'a za pomocą posiadanego źródła szumów o znanym ENR i wyliczeniu zastępczego ENR na podstawie zmienionych odczytów współczynnika szumów badanego DUT.

Trudnością w stosowaniu tej metody jest konieczność posiadania kalibrowanego źródła szumów, najlepiej o ENR zbliżonym do przewidywanego ENR mierzonego źródła. Przyznacie, że w warunkach amatorskich dość ciężki warunek do spełnienia...

Metody wyznaczania ENR

Inną metodą jest bezpośredni pomiar mocy źródła szumów dla stanu załączonego i wyłączzonego i na tej podstawie wyliczenie ENR. Jest w tej metodzie kilka trudności.

Po pierwsze w temperaturze 290K jak wynika z równania [3] moc szumów rezystora 50 omów to około -174 dBm... (przy okazji, jak zobaczycie kiedyś chiński analizator widma mający DANL poniżej tej wartości to bądźcie pewni, że narodziła się nowa fizyka...).

Aby móc cokolwiek sensownie zmierzyć, współczynnik szumów analizatora powinien być istotnie niższy niż moc szumów idealnego rezystora powiększona o ENR.

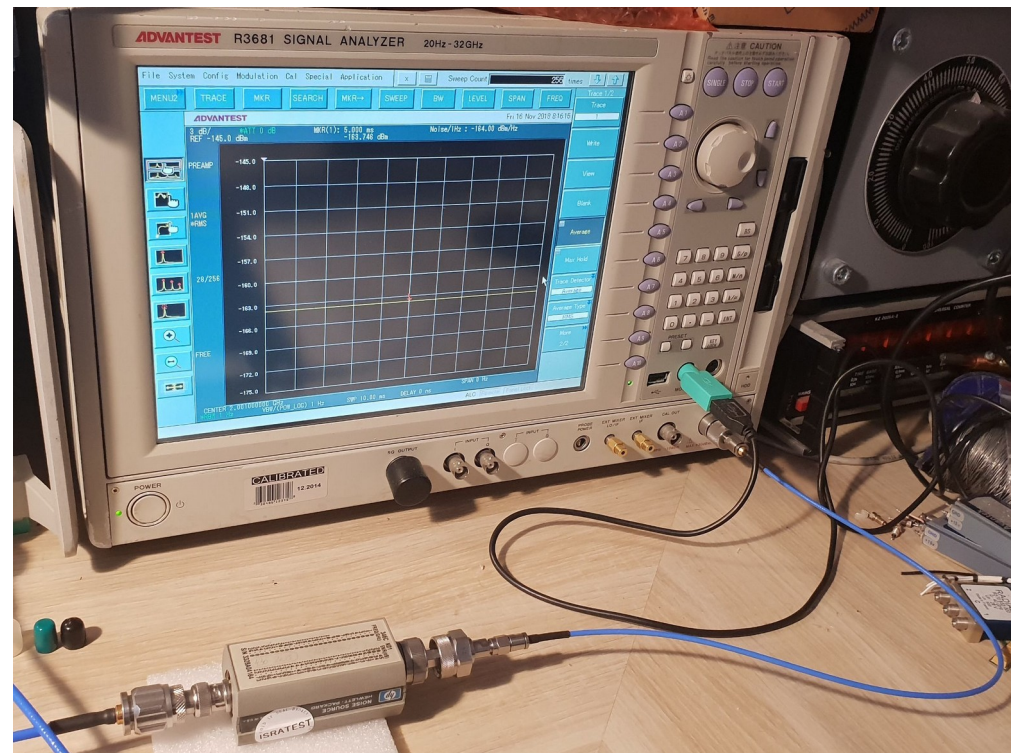
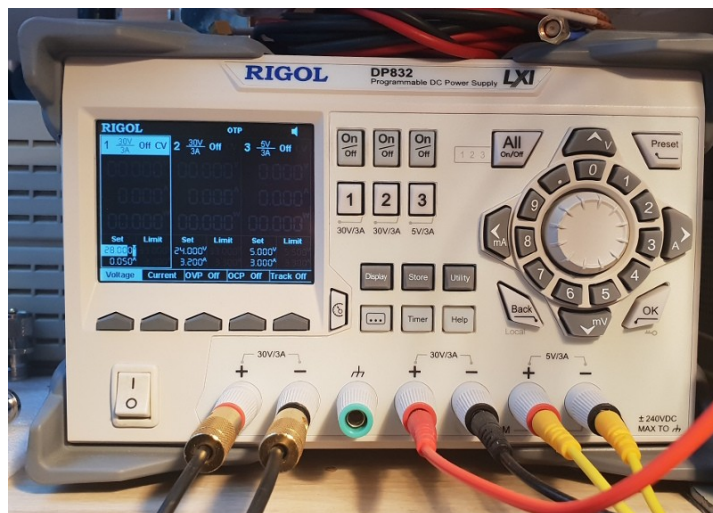
Metody wyznaczania ENR

Ma też ta metoda istotną zaletę. Mianowicie pozwala wyznaczyć ENR nieznanego źródła bez posiadania źródła wzorcowego lub posiadając źródło wzorcowe różniące się istotnie od mierzonego.

Te względy spowodowały, że zdecydowałem się na wykonanie pomiarów tą metodą, które pokrótce opiszę.

Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

Jeśli chodzi o skomplikowanie stanowiska pomiarowego, to prezentowana metoda jest prosta. Potrzebujemy analizatora widma i zasilacza.



Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

Ja zastosowałem posiadany analizator widma Advantest R3681 o paśmie od 20Hz do 32 GHz. To przyrząd, który na swoje czasy prezentował bardzo dobre parametry w dziedzinie szumów. Posiada wbudowany przedwzmacniacz o wzmacnieniu około 20 dB pracujący w zakresie 100 kHz do 3,5 GHz. Zastosowanie wewnętrznego przedwzmacniacza ma tą zaletę, że nie musimy dokładnie znać jego parametrów, gdyż producent je zmierzył i przyrząd automatycznie wprowadza korektę w odczycie poziomu. Aby uzyskać jak najdokładniejsze odczyty (no powiedzmy szczerze, jakiegokolwiek w granicach sensu...) zastosowałem kilka optymalizacji ustawień.

Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

- a) Ustawienie RBW (resolution bandwidth) na najmniejszą dostępną wartość. W moim przypadku 1 Hz.
- b) Ustawienie tłumika na wejściu na 0 dB. **Uwaga! to ustawienie wymaga arcy-ostrożnego obchodzenia się z wejściem analizatora.** Diody mieszacza są bardzo czułe na ładunki statyczne, dodatkowo w moim przypadku jest zastosowane sprzężenie DC.
- c) Zastosowanie ze względu na czas przemiatania najmniejszego dostępnego zakresu przemiatania (SPAN). W moim analizatorze dostępny jest tryb ZERO-SPAN, który wybrałem. Analizator staje się odbiornikiem mierzącym moc na jednej częstotliwości w dziedzinie czasu.
- d) Zastosowanie bezpośredniego markera odczytującego gęstość widmową. Sam koryguje wskazania w zależności od ustawionego pasma.
- e) Wybór detektora RMS i uśrednianie, uśrednianie, uśrednianie...

Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

W pierwszym kroku dokonałem pomiaru temperatury, pomiary gęstości widmowej szumów przy wyłączonym zasilaczu źródła szumów i pomiaru przy podanym napięciu +28 V DC do źródła szumów.

File System Config Modulation Cal Special Application [x] [Calculator] Sweep Count **256** times [Down Arrow] [Up Arrow]

MENU2 [Left Arrow] TRACE MKR SEARCH MKR→ SWEEP BW LEVEL SPAN FREQ

ADVANTEST Fri 16 Nov 2018 8:23:08

3 dB/ *ATT 0 dB MKR(1): 5.000 ms Noise/1Hz : -163.28 dBm/Hz
 REF -145.0 dBm -163.024 dBm

PREAMP 1VIEW #RMS

FREE

CENTER 2.001000000 GHz SPAN 0 Hz
 *RBW 1 Hz VBW/(POW_LOG) 1 Hz SWP 10.00 ms DELAY 0 ns

ALC [Remote] [Panel Lock]

Trace 1/2
 Trace 1
 Write
 View
 Blank
 Average
 Max Hold
 Trace Detector
 Average
 Average Type
 RMS
 More
 2/2

MENU2 TRACE MKR SEARCH MKR→ SWEEP BW LEVEL SPAN FREQ

ADVANTEST

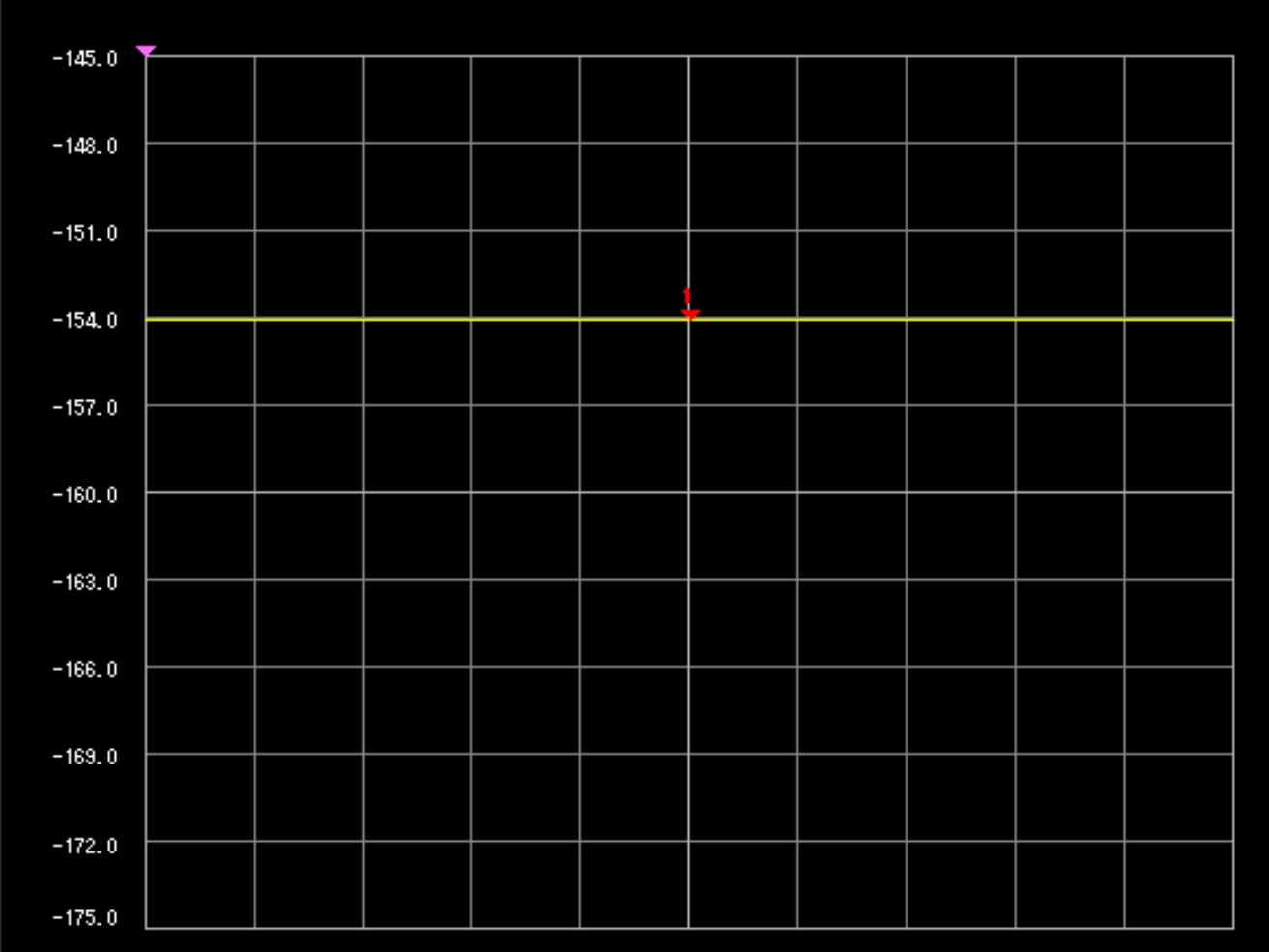
Fri 16 Nov 2018 8:14:20

3 dB/ *ATT 0 dB MKR(1): 5.000 ms Noise/1Hz : -154.34 dBm/Hz
REF -145.0 dBm -154.082 dBm

PREAMP

1VIEW *RMS

FREE



CENTER 2.001000000 GHz *RBW 1 Hz VBW/(POW_LOG) 1 Hz SWP 10.00 ms DELAY 0 ns SPAN 0 Hz

Trace 1/2

Trace 1

Write

View

Blank

Average

Max Hold

Trace Detector

Average

Average Type

RMS

More

2/2

ALC Remote Panel Lock

Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

Po pierwsze na podstawie wzoru [3] wyliczyłem poprawkę od temperatury 290K, przyjętej za standard w pomiarach szumów.

$$[4] \text{Poprawka}_{\text{deltaT}} = -10\log(T/290) \text{ [dB]}$$

Następnie informacyjnie wyliczyłem współczynnik szumów analizatora widma. Ma to o tyle znaczenie, ENR badanego źródła powinien być znacząco wyższy niż współczynnik szumów analizatora.

$$[5] \text{NF} = P_{\text{COLD}} + 174 + 2,51 + \text{Poprawka}_{\text{deltaT}} \text{ [dB]}$$

P_{COLD} jest odczytem „podłogi” szumów, przy wyłączonym zasilaniu źródła. 2,51 dB jest wartością o którą detektor RMS zawyża odczytany poziom szumów.

Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

Następnie dokonałem wyliczenia współczynnika Y

$$[6] Y = P_{\text{HOT}} - P_{\text{COLD}} \text{ [dB]}$$

I stąd już prosta droga do wyznaczenia ENR

$$[7] \text{ENR} = \text{NF} + (10 \log(10^{(Y/10)} - 1)) \text{ [dB]}$$

Na podstawie powyższego aparatu stworzyłem arkusz kalkulacyjny automatyzujący obliczenia.

WPISYWAĆ W ŻÓLTE POLA. POLA ZIEŁONE TO WYNIKI.

1. Ustawić SA na pożądaną częstotliwość i zerwać wejście obciążeniem 50 Ohm. Można zastosować ZERO SPAN.
2. Ustawić marker na gęstość widmową [dBm/Hz]
3. Detektor RMS, uśrednianie (np. 128 razy)
4. Odczytać za pomocą markera z gęstością widmową DANL

f	0,145	[GHz]	Częstotliwość pomiaru	0,43	1	2	3	[GHz]
T	23	[°C]	Temperatura aktualna w stopniach Celsjusza	21,7	23	21,7	21,7	[°C]
T	296,15	[K]	Temperatura aktualna w Kelwinach	294,85	296,15	294,85	294,85	[K]
PoprawkaT	-0,091137391	[dB]	Poprawka w stosunku do temperatury 290K	-0,072031342	-0,091137391	-0,072031342	-0,072031342	[dB]
DANL	-166,13	[dBm/Hz]	Podłoga szumowa z detektorem RMS mocy	-165,78	-164,74	-163,28	-160,13	[dBm/Hz]
NF	10,28886261	[dB]	Współczynnik szumów analizatora	10,65796866	11,67886261	13,15796866	16,30796866	[dB]

5. Podłączyć badane źródło szumów i odczytać markerem gęstość widmową

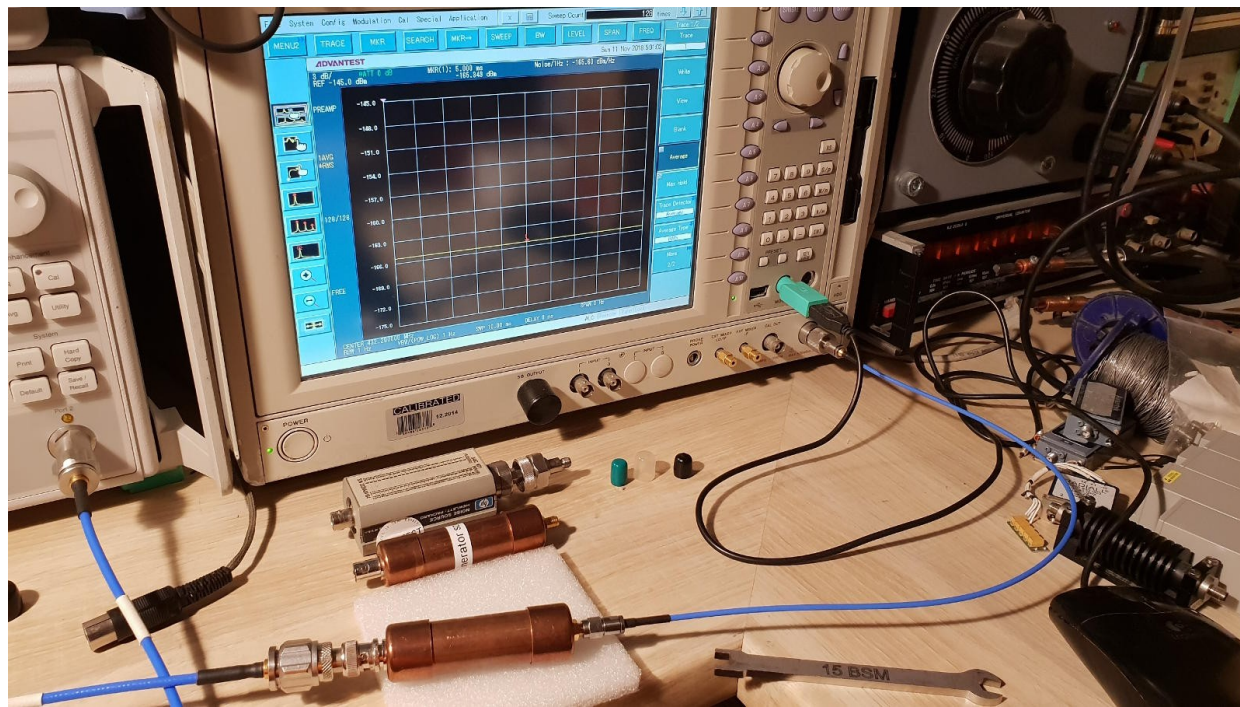
Phot	-157,02	[dBm/Hz]		-154,17	-155,34	-154,34	-153,71	[dBm/Hz]
Pcold	-166,0388626	[dBm/Hz]	W naszym przypadku równa się DANL	-165,7079687	-164,6488626	-163,2079687	-160,0579687	[dBm/Hz]
Y	9,018862609	[dB]	Współczynnik Y wyrażony w dB	11,53796866	9,308862609	8,867968658	6,347968658	[dB]
ENR	18,72608341	[dB]	ENR źródła szumów	21,87993387	20,4461013	21,42223483	21,51040964	[dB]

Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

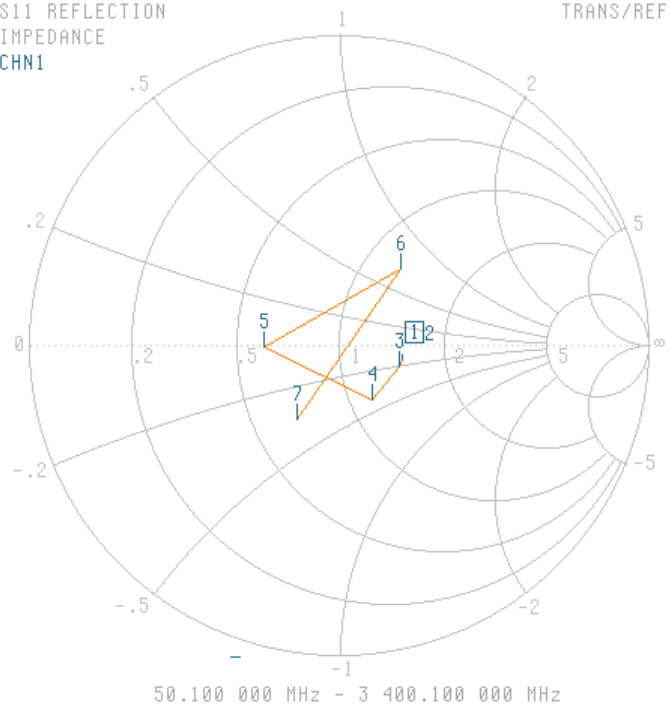
Na podstawie pomiaru kalibrowanego źródła, dla którego dysponowałem wartościami ENR oceniłem przydatność metody.

f [GHz]	ENR org [dB]	ENR SQ1GQC [dB]	odchyłka [dB]
0,145	18,21	18,73	-0,52
0,43	20,25	21,87	-1,62
1	20,45	20,45	0
2	20,34	21,42	-1,08
3	20,01	21,51	-1,5

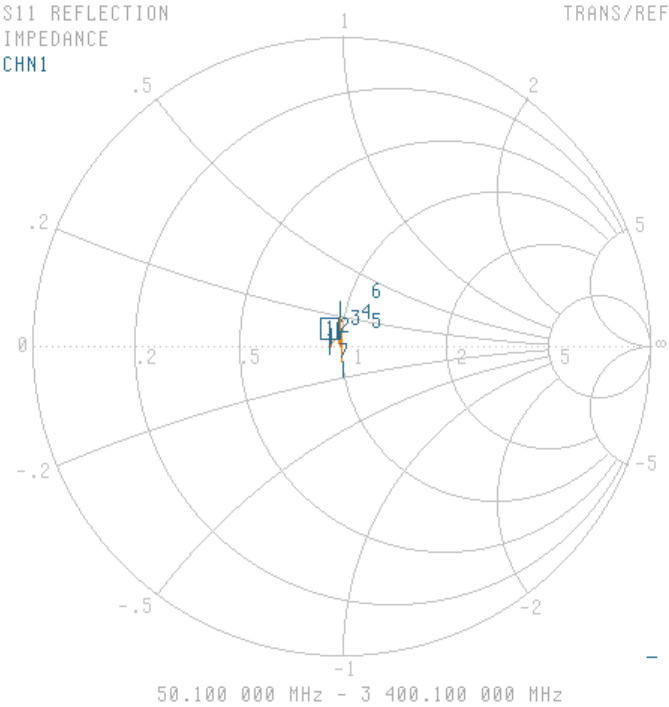
Następnie dokonałem pomiarów źródeł szumów wykonanych przez Jacka SP1CNV.



S11 REFLECTION
IMPEDANCE
CHN1



S11 REFLECTION
IMPEDANCE
CHN1



Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

Pomiary ENR źródeł szumów

Egzemplarz z naklejką

f	[MHz]	Częstotliwość pomiaru	50,10	70,20	144,30	432,20	1296,20	2320,20	3400,10
T	[°C]	Temperatura aktualna w stopniach Celsjusza	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
T	[K]	Temperatura aktualna w Kelwinach	295,15	295,15	295,15	295,15	295,15	295,15	295,15
DANL	[dBm/Hz]	Podłoga szumowa z detektorem RMS mocy	-166,58	-167,51	-166,76	-166,89	-165,09	-162,36	-157,63
NF	[dB]	Współczynnik szumów analizatora	9,93	9,00	9,75	9,62	11,42	14,15	18,88
Phot	[dBm/Hz]	Gęstość przy załączonym +28 V	-149,94	-149,20	-149,50	-149,19	-148,88	-149,27	-151,48
Pcold	[dBm/Hz]	W naszym przypadku równa się DANL	-166,58	-167,51	-166,76	-166,89	-165,09	-162,36	-157,63
Y	[dB]	Współczynnik Y wyrażony w dB	16,64	18,31	17,26	17,70	16,21	13,09	6,15
ENR	[dB]	ENR źródła szumów	26,47	27,25	26,93	27,25	27,52	27,02	23,82

Egzemplarz bez naklejki

f	[MHz]	Częstotliwość pomiaru	50,10	70,20	144,30	432,20	1296,20	2320,20	3400,10
T	[°C]	Temperatura aktualna w stopniach Celsjusza	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
T	[K]	Temperatura aktualna w Kelwinach	295,15	295,15	295,15	295,15	295,15	295,15	295,15
DANL	[dBm/Hz]	Podłoga szumowa z detektorem RMS mocy	-167,12	-166,50	-166,15	-165,44	-164,02	-162,81	-157,92
NF	[dB]	Współczynnik szumów analizatora	9,39	10,01	10,36	11,07	12,49	13,70	18,59
Phot	[dBm/Hz]	Gęstość przy załączonym +28 V	-154,11	-154,10	-154,11	-154,77	-153,62	-153,28	-154,40
Pcold	[dBm/Hz]	W naszym przypadku równa się DANL	-167,12	-166,50	-166,15	-165,44	-164,02	-162,81	-157,92
Y	[dB]	Współczynnik Y wyrażony w dB	13,01	12,40	12,04	10,67	10,40	9,53	3,52
ENR	[dB]	ENR źródła szumów	22,18	22,15	22,12	21,35	22,47	22,72	19,56

Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

Podsumowanie pomiarów i moje wnioski

- a) metoda nadaje się do pomiaru źródeł o stosunkowo dużym ENR.
- b) można ją rozszerzyć na zastosowanie analizatora z gorszymi parametrami (wyższymi szumami). Trzeba w takim przypadku zastosować zewnętrzny przedwzmacniacz. Należy jednak znać wzmocnienie przedwzmacniacza dla danej częstotliwości i skorygować wzmocnienie analizatora widma. Wiele analizatorów umożliwia wprowadzenie współczynników korekcyjnych i samemu koryguje odczyt. Nie musimy znać wcześniej współczynnika szumów analizatora lub zestawu analizator+wzmacniacz. Możemy go zmierzyć.

Zastosowana metoda i uzyskane wyniki

A co z paradoksem jajka i kury? Jak zmierzono współczynnik szumów pierwszego źródła nie mając go z czym porównać?

Oczywiście żadnego paradoksu tu nie ma. Można posłużyć się fizyką. Do określenia mocy szumów przykładowego źródła (rezystora) wystarczy... termometr, trochę ciekłego helu, barometr, łaźnia parowa i dokładny rezystor 50 omów. Można się i obejść bez ciekłego helu.

Źródło w postaci rezystora na przemian ogrzewanego do 373,15 K (temperatura wrzenia wody) i chłodzonego do temperatury odniesienia 290 K miało by ENR 1,095 dB

Przydatna literatura

1. Keysight Application Note: „ Noise Figure Measurement Accuracy: The Y-Factor Method”
2. Keysight Application Note: „Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements”
3. Keysight Application Note: „Spectrum and Signal Analyzer Measurements and Noise”
4. Whitham D. Reeve Anchorage, Alaska USA „Noise Tutorial” Part I..VI
5. Rohde & Schwarz Application Note: „The Y Factor Technique for Noise Figure Measurements”
6. Christoph Rauscher „Fundamentals of Spectrum Analysis”