

**Take care of your oscillator! The
influence of phase noise on
transmission quality in a radio channel**

**Zadbaj o swój oscylator!
Wpływ szumów fazowych na jakość
transmisji w kanale radiowym**

Paweł Sujkowski
SQ1GQC

Zieleniec
30.08.2025

Plan prezentacji

Agenda

1. Moje motywacje i wstęp
My motivations and introduction

2. Kilka słów teorii
A few words of theory

3. Opis eksperymentów
Description of experiments

4. Praktyczna prezenacja i wnioski
Practical demonstration and conclusion

1. Moje motywacje i wstęp

My motivations and introduction

Temat szumów fazowych od zawsze był jednym z centrów moich zainteresowań. Brałem udział w projektach dotyczących głównie ich metrologii. Kłopotliwa była za to odpowiedź na padające czasem pytanie, „*Po co temu poświęcać tyle uwagi?*” Postanowiłem podać odpowiedź na to pytanie, wpisując się w przewodni temat tegorocznych prezentacji.

The subject of phase noise has always been one of my main areas of interest. I have participated in projects mainly related to its metrology. However, it was difficult to answer the question that sometimes comes up: „Why pay so much attention to it?” I decided to answer this question by joining the main theme of this year's presentations.

1. Moje motywacje i wstęp

My motivations and introduction

Uznałem, że czysta teoria może być „ciężkostrawna” i nudna. Jednocześnie sam chciałem poznać odpowiedź na zadane wcześniej pytanie. Uznałem, że najlepszym rozwiązaniem może być eksperyment, który pozwoli osobiście się o tym przekonać.

I decided that pure theory could be boring. At the same time, I wanted to find out the answer to the question I had asked earlier. I decided that the best solution would be to conduct an experiment that would allow me to find out for myself.

1. Moje motywacje i wstęp

My motivations and introduction

Dzięki wydatnej pomocy Jacka SP1CNV zbudowaliśmy eksperymentalny układ łącza radiowego małej mocy pracującego na częstotliwości 10,3682 GHz z modulacją CW, który pozwoli nam zademonstrować zjawiska związane z wpływem szumów fazowych oscylatora lokalnego na jakość transmisji. Dziękuję Jacku!

Thanks to the significant help of Jacek SP1CNV, we have built an experimental low-power radio link operating at a frequency of 10.3682 GHz with CW modulation, which will allow us to demonstrate the phenomena related to the impact of local oscillator phase noise on transmission quality. Thank you, Jacek!

2. Kilka słów teorii

A few words of theory

Czym są szumy fazowe?

Szumy fazowe to to w uproszczeniu przypadkowe fluktuacje fazy sygnału, które występują w oscylatorach i wzmacniaczach. Są one niepożądanym zjawiskiem, które powoduje odchylenia fazy sygnału od jego idealnej, stabilnej wartości, co prowadzi do poszerzenia widma sygnału.

What is phase noise?

Phase noise is, in simple terms, random fluctuations in the phase of a signal that occur in oscillators and amplifiers. It is an unwanted phenomenon that causes the signal phase to deviate from its ideal, stable value, leading to a broadening of the signal spectrum.

2. Kilka słów teorii

A few words of theory

Nie jest moim celem dzisiaj wykład na temat istoty szumów fazowych, gdyż to temat zbyt szeroki by zamknąć go w krótkiej prezentacji. Zainteresowani i tak sami muszą zgłębić tę wiedzę. W części teoretycznej chciałbym skupić się jedynie na zasygnalizowaniu zjawisk związanych z szumami fazowymi z którymi mamy do czynienia w łączy radiowym.

My goal today is not to give a lecture on the nature of phase noise, as this topic is too broad to cover in a short presentation. Those who are interested will have to explore this knowledge on their own. In the theoretical part, I would like to focus only on pointing out the phenomena related to phase noise that we encounter in radio links.

2. Kilka słów teorii

A few words of theory

Zjawisko „przenoszenia szumu fazowego”.

Jest to proces, gdzie szum fazowy generowany w jednej części układu (oscylator, syntezer) jest przekazywany lub moduluje inne części systemu czy łącza, wpływając na ogólny poziom szumu fazowego i degradację SNR.

The phenomenon of “phase noise transfer”

This is a process where phase noise generated in one part of the system (oscillator, synthesizer) is transferred or modulates other parts of the system or link, affecting the overall phase noise level and degrades SNR.

2. Kilka słów teorii

A few words of theory

Zjawisko mieszania zwrotnego.

W odbiorniku superheterodynowym to proces, w którym szum fazowy lokalnego oscylatora (heterodyny) miesza się z silnymi sygnałami interferencyjnymi znajdującymi się blisko częstotliwości odbieranego sygnału. W rezultacie, szumy te są przenoszone do pasma częstotliwości pośredniej (IF).

The phenomenon of reciprocal mixing.

In a superheterodyne receiver, this is a process in which the phase noise of the local oscillator (heterodyne) mixes with strong interference signals close to the frequency of the received signal. As a result, this noise is transferred to the intermediate frequency (IF) band.

2. Kilka słów teorii

A few words of theory

Moja hipoteza dotycząca izolacji LO-RF i odbić od portu RF.

Uprzedzając nieco prezentację praktyczną, sądzę że będziemy mieli także do czynienia z „Przenoszeniem szumu fazowego” poprzez ograniczoną izolację portów LO i RF mieszacza oraz odbicia od anteny i obiekty w pobliżu.

My hypothesis regarding LO-RF isolation and reflections from the RF port.

Anticipating the practical presentation somewhat, I believe that we will also be dealing with “phase noise transfer” due to limited isolation of the mixer's LO and RF ports and reflections from the antenna and nearby objects.

2. Kilka słów teorii

A few words of theory

Charakterystyka sygnałów wykorzystywanych w radiokomunikacji amatorskiej a szumy fazowe. Nasze modulacje są zazwyczaj wąskopasmowe. Są przez to bardzo podatne na zakłócenia wynikające z szumów fazowych. Modele szumów fazowych jasno pokazują ich najwyższe wartości w bliskich odległościach od nośnej.

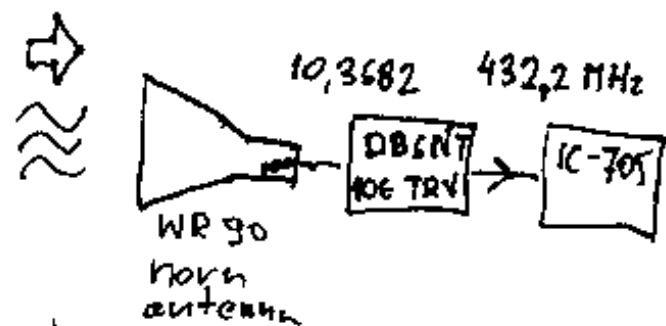
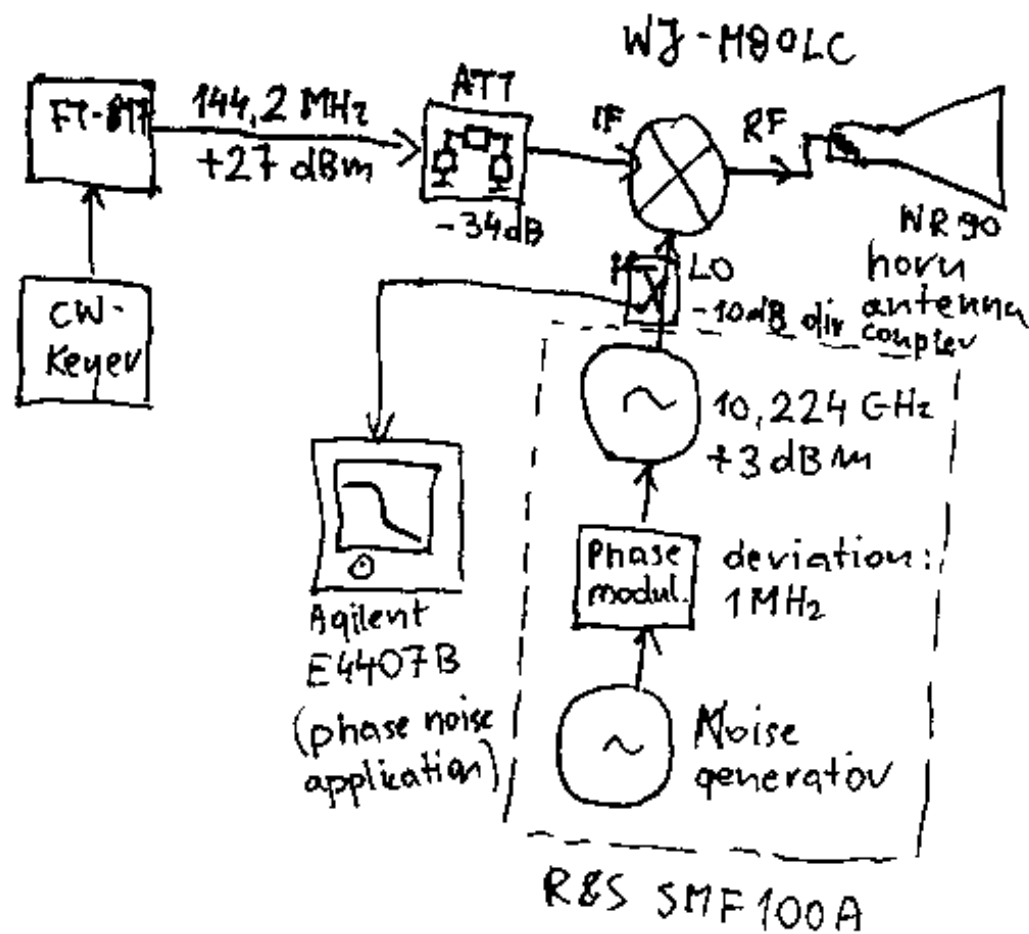
Characteristics of signals used in amateur radio communication and phase noise. Our modulations are usually narrowband. This makes them very susceptible to interference from phase noise. Phase noise models clearly show their highest values at close distances from the carrier.

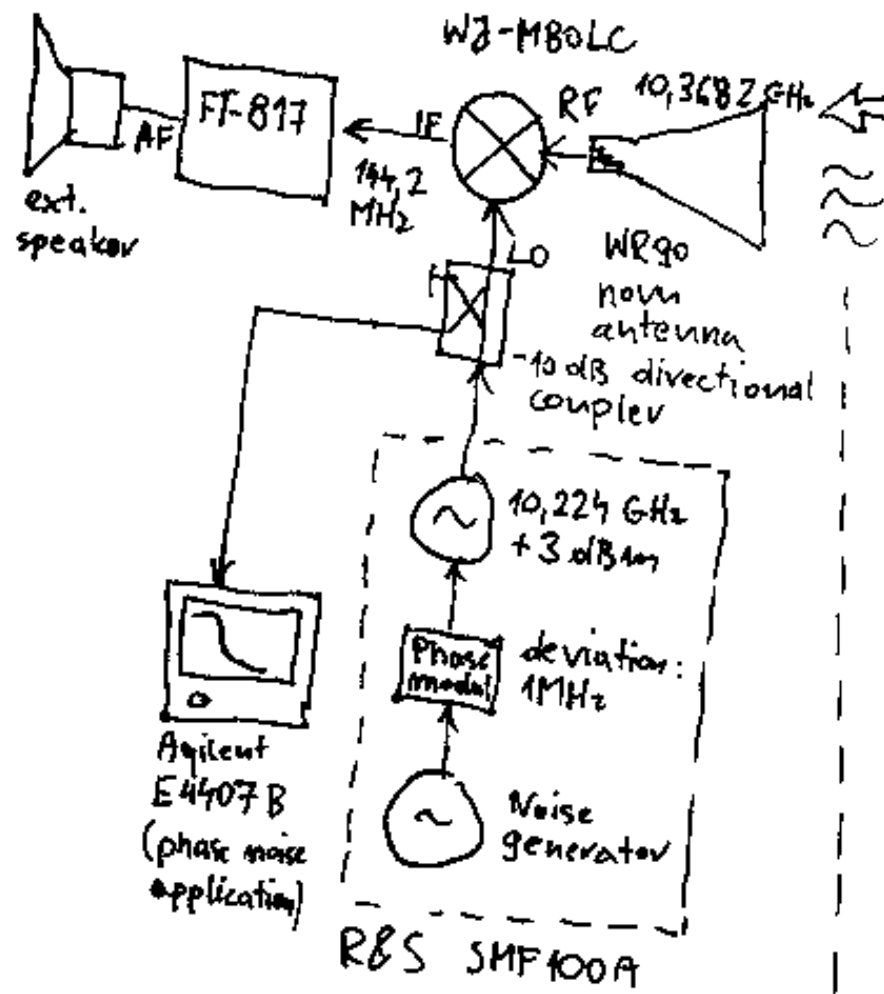
3. Opis eksperymentów

Description of experiments

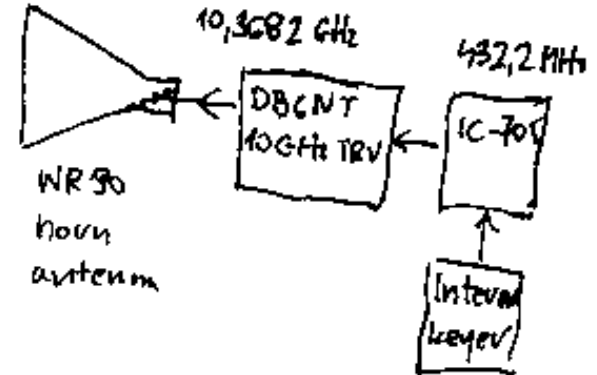
Celem zweryfikowania wpływu szumów fazowych na jakość transmisji sygnałów poprzez kanał radiowy przygotowaliśmy prosty kanał radiowy na 10,3682 GHz który chciałbym w skrócie omówić. Zaczniemy od schematu blokowego.

In order to verify the impact of phase noise on the quality of signal transmission via a radio channel, we have prepared a simple radio channel at 10.3682 GHz, which I would like to briefly discuss. Let's start with a block diagram.





RX Part of radio link



TX Part of radio link

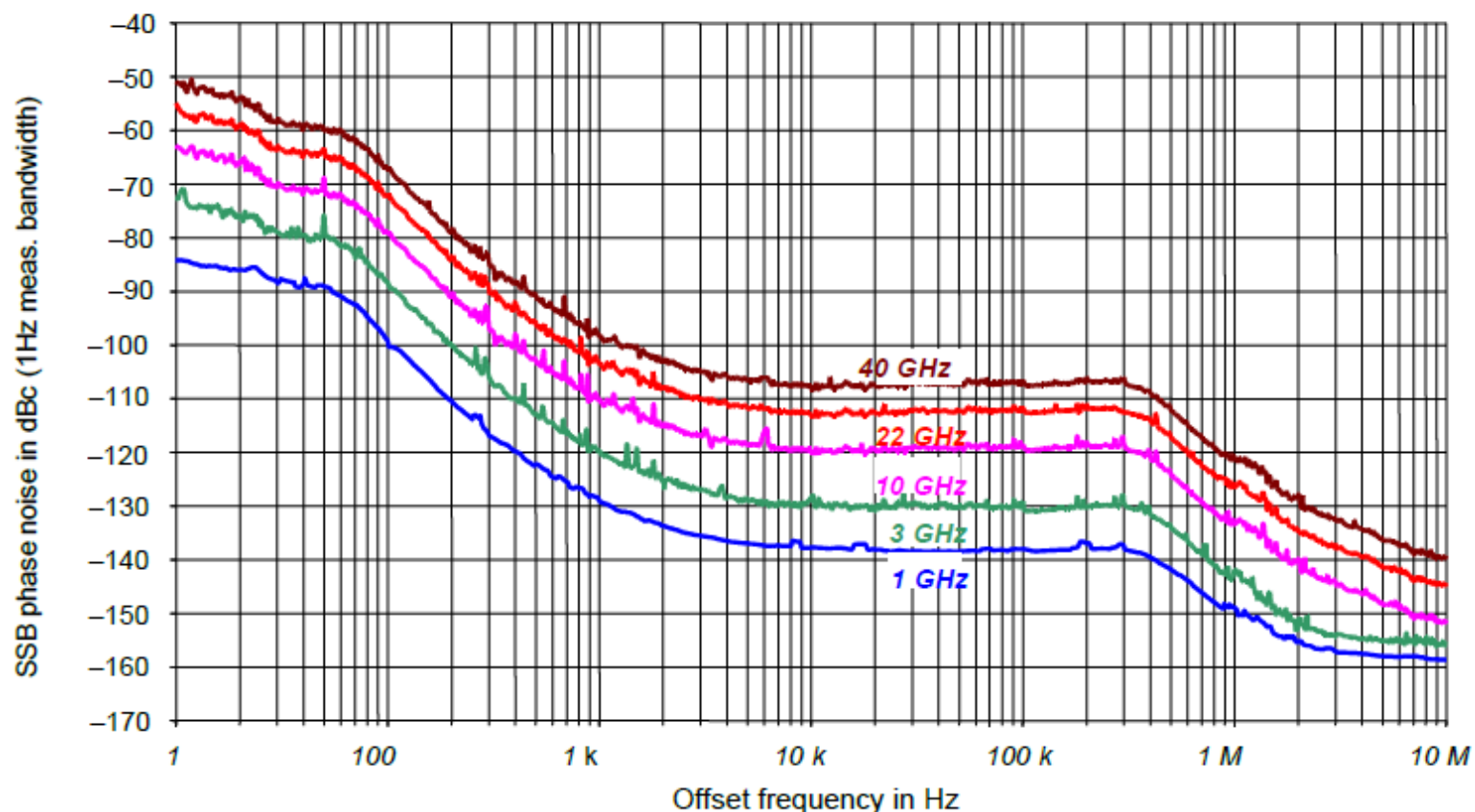
3. Opis eksperymentów

Description of experiments

W obu przypadkach kluczowym elementem umożliwiającym przeprowadzenie eksperymentów jest generator sygnałów Rohde Schwarz SMF100A (1 GHz-22 GHz) wyposażony w opcję B20. Sam będąc źródłem sygnału o wybitnej czystości pozwala generować sygnały o zdegenerowanych szumach fazowych.

In both cases, the key element that allows the experiments to be carried out is the Rohde Schwarz SMF100A signal generator (1 GHz-22 GHz) equipped with the B20 option. Being a source of exceptionally pure signals itself, it allows the generation of signals with degenerate phase noise.

Carrier frequency	SSB phase noise with R&S®SMF-B1 option, measurement bandwidth 1 Hz, CW				
	frequency offset from carrier				
	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
250 MHz	< -72 dBc	< -90 dBc	< -115 dBc	< -126 dBc	< -128 dBc
1 GHz	< -77 dBc	< -95 dBc	< -120 dBc	< -132 dBc	< -133 dBc
2 GHz	< -71 dBc	< -89 dBc	< -114 dBc	< -128 dBc	< -127 dBc
4 GHz	< -65 dBc	< -83 dBc	< -108 dBc	< -122 dBc	< -121 dBc
10 GHz	< -57 dBc	< -75 dBc	< -100 dBc	< -115 dBc	< -113 dBc
20 GHz	< -51 dBc	< -69 dBc	< -94 dBc	< -109 dBc	< -107 dBc
30 GHz	< -47 dBc	< -65 dBc	< -90 dBc	< -105 dBc	< -103 dBc
40 GHz	< -45 dBc	< -63 dBc	< -88 dBc	< -103 dBc	< -101 dBc



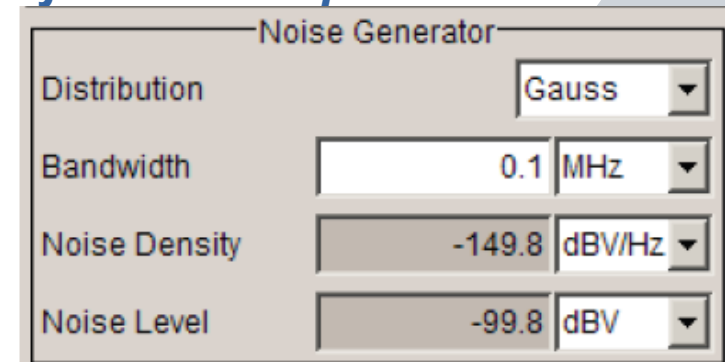
Single sideband phase noise for various frequencies (each with the R&S®SMF-B1 OCXO reference oscillator option).

3. Opis eksperymentów

Description of experiments

Opcja SMF-B20 (AM/FM/ ϕ M/LOG AM Modulator) jako jedno z opcjonalnych źródeł sygnału modulującego pozwala zastosować wbudowany generator szumów o kształtowanej charakterystyce. W eksperymencie przyjąłem gęstość widmową z dystrybucją normalną i pasmo szumów 1 MHz i modulację fazy z regulowaną dewiacją.

The SMF-B20 option (AM/FM/ ϕ M/LOG AM Modulator) as one of the optional modulating signal sources allows the use of a built-in noise generator with shaped characteristics. In the experiment, I assumed a spectral density with normal distribution and a noise bandwidth of 1 MHz and phase modulation with adjustable deviation.



The screenshot shows a 'Noise Generator' control panel with the following settings:

Noise Generator	
Distribution	Gauss
Bandwidth	0.1 MHz
Noise Density	-149.8 dBV/Hz
Noise Level	-99.8 dBV

3. Opis eksperymentów

Description of experiments

Mieszacz WJ M80LC

Nominalny poziom LO: +0 dBm

WJ M80LC mixer.

Nominal LO Level: +0 dBm

WJ-M80L/ M80LC

DOUBLE-BALANCED MIXER

LO 4 TO 18 GHz

RF 7 TO 18 GHz

IF DC TO 3000 MHz

LO DRIVE +0 dBm (nominal)

- STARVED LO -0 dBm LO POWER
- HERMETICALLY SEALED

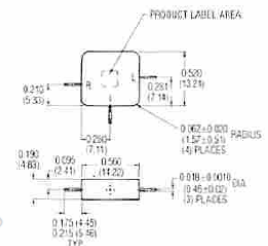


Guaranteed Specifications¹

Characteristics	Min.	Typ. ²	Max.	Test Conditions
SSB Conversion Loss and SSB Noise Figure		8.0 dB 9.0 dB	10.0 dB 11.0 dB	$f_R = 7$ to 18 GHz $f_L = 6$ to 18 GHz $f_I = 30$ to 1000 MHz $f_R = 7$ to 18 GHz $f_L = 4$ to 18 GHz $f_I = 30$ to 3000 MHz
Isolation				
L to R	22 dB 19 dB	31 dB 27 dB		$f_L = 4$ to 15 GHz $f_L = 15$ to 18 GHz
L to I	26 dB 17 dB	34 dB 25 dB		$f_L = 9$ to 18 GHz $f_L = 4$ to 9 GHz
Conversion Compression			1.0 dB	f_R Level -2 dBm
Third-Order Input Intercept		+7 dBm		$f_{R1} = 13.00$ GHz, $f_{R2} = 13.01$ GHz both at -15 dBm $f_L = 14$ GHz at 0 dBm

Outline Drawings

M80L (MINPAC)



DIMENSIONS ARE IN INCHES (MILLIMETERS)
±.010 (±.25) UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

M80LC (CONNECTORIZED)

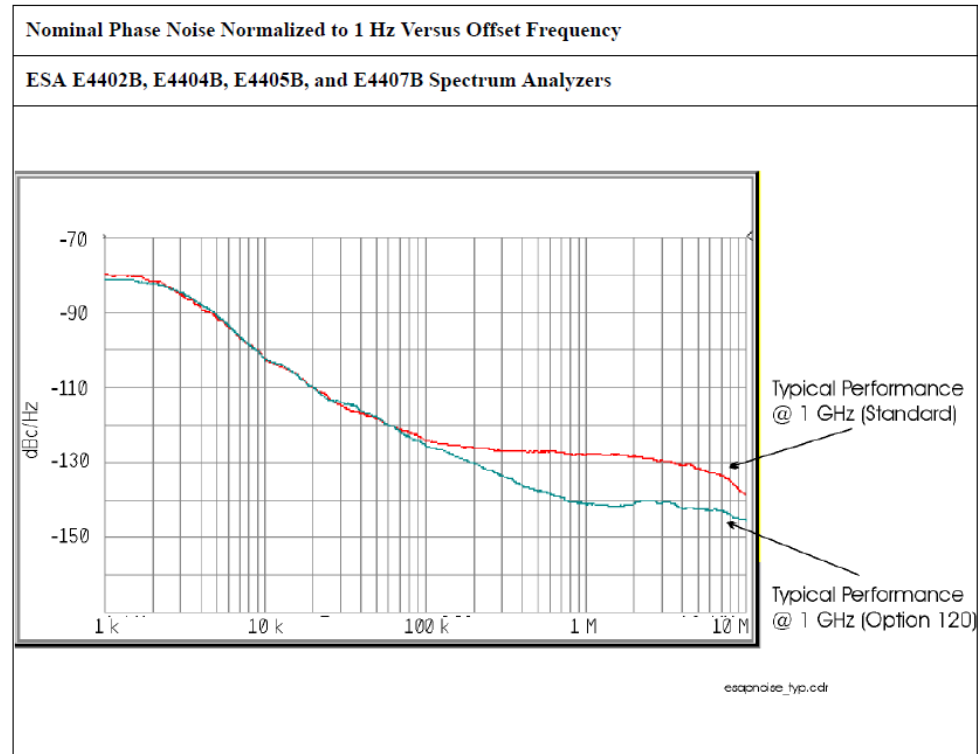


3. Opis eksperymentów

Description of experiments

Analizator widma Agilent ESA E4407B z opcją 226 (pomiar szumów fazowych)

Spectrum Analyzer Agilent ESA E4407B with option 226 (phase noise measurements)



4. Praktyczna prezentacja i wnioski

Practical demonstration and conclusion

W pierwszej części praktycznej prezentacji generator o regulowanych szumach fazowych zastosowany zostanie w torze nadawczym układu. Na analizatorze widma z uruchomioną aplikacją pomiaru szumów fazowych możliwy będzie monitoring przebiegu szumów heterodyny. Sygnał IF dostarczony zostanie z FT-817 z zewnętrznym keyerem. Odbiór za pomocą TRV DB6NT i IC-705.

In the first part of the practical presentation, a generator with adjustable phase noise will be used in the transmission path of the system. On the spectrum analyzer with the phase noise measurement application running, it will be possible to monitor the heterodyne noise waveform. The IF signal will be supplied from the FT-817 with an external keyer. Reception will be via the TRV DB6NT and IC-705.

4. Praktyczna prezentacja i wnioski

Practical demonstration and conclusion

W drugiej części prezentacji generator o regulowanych szumach fazowych zastosowany zostanie w torze odbiorczym układu. Na analizatorze widma z uruchomioną aplikacją pomiaru szumów fazowych możliwy będzie monitoring przebiegu szumów heterodyny. Sygnał IF skierowany zostanie do FT-817 z zewnętrznym głośnikiem. Nadawanie za pomocą TRV DB6NT i IC-705 z wbudowanym keyerem.

In the second part of the presentation, a generator with adjustable phase noise will be used in the receiving path of the system. On the spectrum analyzer with the phase noise measurement application running, it will be possible to monitor the heterodyne noise waveform. The IF signal will be directed to the FT-817 with an external speaker. Transmission using TRV DB6NT and IC-705 with built-in keyer.

4. Praktyczna prezenacja i wnioski

Practical demonstration and conclusion

Wnioski:

1. Szumy fazowe heterodyny mają kapitalne znaczenie dla SNR w torze transmisji radiowej w szczególności dla wąskopasmowych modulacji stosowanych przez radioamatorów! Dotyczy to tak nadajnika jak i odbiornika.
2. Największe znaczenie mają szumy których wstęgi boczne leżą blisko nośnej. Są także najcięższe do pomiarów. Nie widać ich na prostym analizatorze szumów fazowych.

Conclusions:

1. *Heterodyne phase noise is of major importance for SNR in radio transmission, especially for narrowband modulations used by radio amateurs! This applies to both the transmitter and the receiver.*
2. *The most important noise is that whose sidebands lie close to the carrier. It is also the most difficult to measure. It is not visible on a simple phase noise analyzer.*

4. Praktyczna prezenacja i wnioski

Practical demonstration and conclusion

3. Degradację sygnałów radiowych spowodowaną szumami fazowymi ciężko jest nieraz odróżnić od efektów znanych nam zjawisk propagacyjnych (odbicie od zorzy, rain scatter). Mechanizmy są podobne - fluktuacje fazy spowodowane zmianami długości ścieżki propagacji sygnału.
4. Zastosowaliśmy relatywnie małe poziomy sygnału aby nie zamaskować niekorzystnych zjawiska (przy nadawaniu z FT-817 moc to około 100 μW).
5. Zastosowaliśmy IF z różnych pasm w TX i RX aby wyeliminować łączność na IF.

3. Radio signal degradation caused by phase noise is often difficult to distinguish from the effects of known propagation phenomena (auroral reflection, rain scatter). The mechanisms are similar – phase fluctuations caused by changes in the length of the signal propagation path.

4. We used relatively low signal levels so as not to mask negative phenomena (when transmitting with FT-817, the power is about 100 μW).

5. We used IF from different bands in TX and RX to eliminate communication via IF.

4. Praktyczna prezenacja i wnioski

Practical demonstration and conclusion

Co zrobić aby zadbać o swój oscylator? Na obecnym etapie rozwoju techniki radiowej i dostępności elementów do naszych konstrukcji, najpowszechniejszym rozwiązaniem są syntezerzy oparte o pętle sprzężenia fazowego (PLL). Tu kryje się najwięcej miejsca do optymalizacji. Choć wiele sposobów optymalizacji daje sprzeczne wyniki. Rozważmy na przykład źródło częstotliwości wzorcowej. Ono jest podstawą najważniejszych dla nas szumów blisko nośnej. Mimo czasem ekstremalnie niskich szumów dobrze opisany jest także proces ich pomiarów. Nie zawsze często stosowany oscylator 10 MHz jest optymalnym rozwiązaniem. Częstotliwość 10 MHz stoi w sprzeczności z dążeniem do jak najwyższej częstotliwości porównywania pętli PLL zmniejszającej szumy dzielnika w pętli (niższe szumy przy niższych podziałach). Współczesne syntezerzy pozwalają na pracę PFD powyżej 100 MHz. Czasem rozwiązaniem może być podwójna pętla np. 5/80 MHz, czy 10/125 MHz. Warto oprócz pomiarów wspierać się oprogramowaniem symulacyjnym producentów syntezerów.

4. Praktyczna prezenacja i wnioski

Practical demonstration and conclusion

What should you do to take care of your oscillator? At the current stage of radio technology development and availability of components for our designs, the most common solution is phase-locked loop (PLL) synthesizers. This is where there is the most room for optimization. However, many optimization methods give conflicting results. Let's consider, for example, the reference frequency source. It is the basis for the most important near-carrier noise for us. Despite sometimes extremely low noise levels, the process of measuring them is also well described. The commonly used 10 MHz oscillator is not always the optimal solution. The 10 MHz frequency conflicts with the desire for the highest possible PLL comparison frequency, which reduces noise in the loop (lower noise at lower divisions). Modern synthesizers allow PFD operation above 100 MHz. Sometimes a double loop, e.g., 5/80 MHz or 10/125 MHz, can be a solution. In addition to measurements, it is worth using simulation software from synthesizer manufacturers.

4. Praktyczna prezentacja i wnioski

Practical demonstration and conclusion

Wybór rozwiązania VCO. Nie zawsze miniaturowe VCO wbudowane w układ scalony zapewni nam potrzebną wydajność. Warto nieraz rozważyć czy to zewnętrzne acz scalone VCO, czy DRO, YIG czy inne nieraz egzotyczne rozwiązania. Po pierwsze symulować po drugie mierzyć i słuchać. Optimalizacja filtra pętli wraz z dostosowaniem do częstotliwości pracy PFD. Symulować, symulować a dopiero budować. Szczególnie przebudowując rozwiązania profesjonalne o innej optymalizacji.

Choosing a VCO solution. Miniature VCOs built into integrated circuits do not always provide the performance we need. It is often worth considering whether to use an external but integrated VCO, DRO, YIG, or other, sometimes exotic, solutions. First, simulate; second, measure and listen. Optimization of the loop filter along with adjustment to the PFD operating frequency. Simulate, simulate, and only then build. This is especially important when rebuilding professional solutions with different optimization.

Dziękuję za uwagę!

Thank you for your attention!

email: SQ1GQC@mm-Lab.pl

x.com: @SQ1GQC