

ZDROJE FREKVENCE

Kurz operátorů

Radioklub OK2KOJ při VUT v Brně

2024/2025

Frekvence - definice

Hertz

- Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894)
- Odvozená jednotka 1/sekunda
- Počet kmitů za sekundu

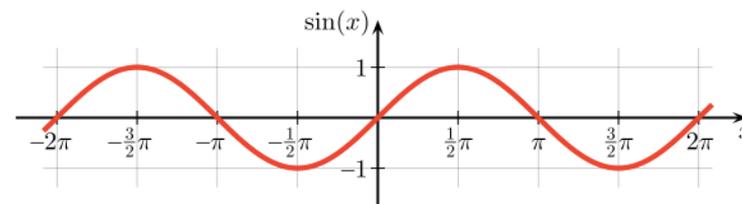
Sekunda

- Do 1960: 1 / 86400 středního slunečního dne
- Od 1960: 1 / 31 556 925,9747 tropického roku
- Od 1967: 9 192 631 770 kmitů záření izotopu Cesium 133
- [2030 plánovaná redefinice na optický standard](#)

Harmonický signál

Sinusovka

- $y = \sin(\varphi) = \sin(\omega t) = \sin(2\pi f t)$
- Perioda 2π radiánů (360°)
- $\varphi = \omega t$
- $\omega = 2\pi f$
- $\varphi = 2\pi f t$

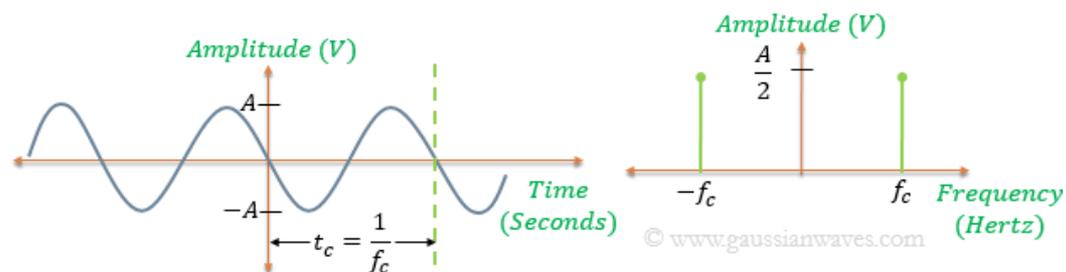


Fáze φ

- radián

Úhlová rychlost ω

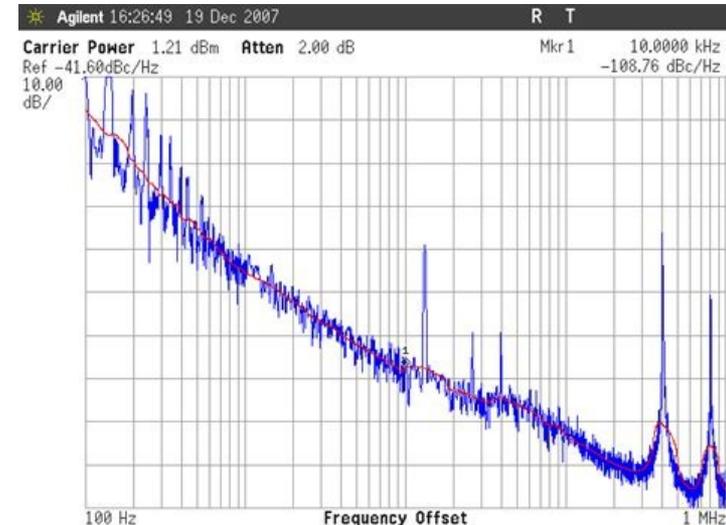
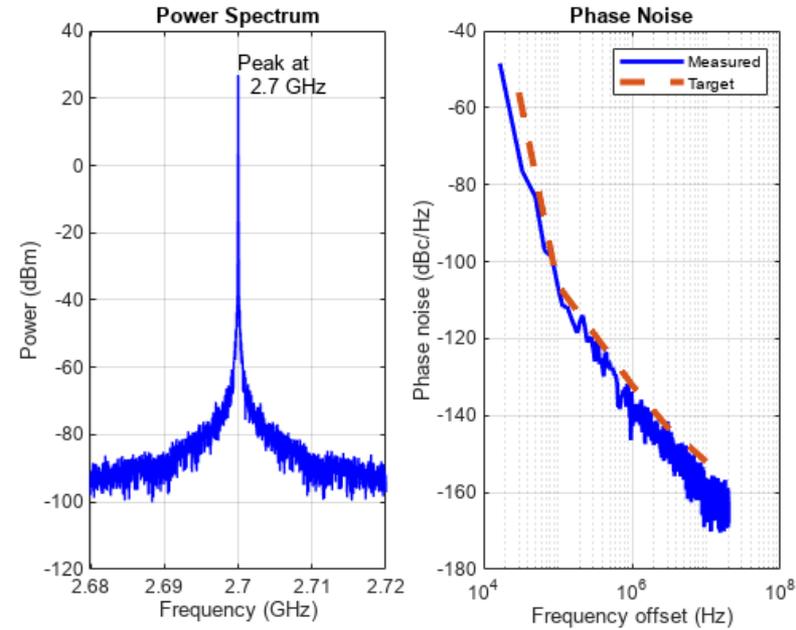
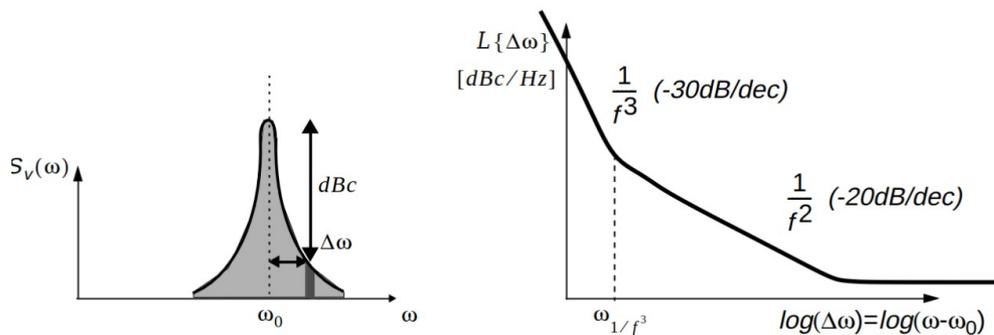
- radián/s



Fázový šum

Krátkodobá stabilita

- dBc/Hz (decibel z nosné na Hz)
- Výkonová spektrální hustota vztažená k výkonu nosné
- 0 dBc = výkon nosné
- Frekvence relativně k nosné
- 0 Hz = nosná



Přesnost / dlouhodobá stabilita

Přesnost

- Absolutní odchylka od ideální frekvence
- Kalibrace

Dlouhodobá stabilita

- Teplota, stárnutí
- Krystalový oscilátor (XO) $\approx 10^{-5}$ (10 ppm)
- Teplotně kompenzovaný k.o. (TCXO) $\approx 10^{-7} - 10^{-6}$ (0.1 – 1 ppm)
- Termostatovaný k.o. (OCXO) $\approx 10^{-9} - 10^{-7}$ (1 – 100 ppb)
- Rubidiový mikrovlnný standard $\approx 10^{-12}$
- Cesiový mikrovlnný standard $\approx 10^{-14}$ až 10^{-16} (≈ 1 s za 300 milionů let)
- Optický standard $\approx 10^{-18}$ (≈ 1 s za 30 miliard let \approx vesmír 14 miliard let)

Přesnost / dlouhodobá stabilita

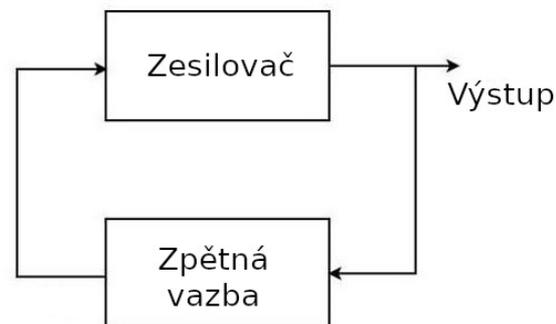
<https://tf.nist.gov/general/pdf/2297.pdf>

Oscillator Type	Rubidium	Cesium	GPSDO
Frequency offset with respect to UTC(NIST) (1 day average)	5×10^{-9} to 5×10^{-12}	1×10^{-12} to 5×10^{-14}	1×10^{-12} to 5×10^{-14}
Stability at 1 second	5×10^{-11} to 5×10^{-12}	5×10^{-11} to 5×10^{-12}	1×10^{-10} to 1×10^{-12}
Stability at 1 day	5×10^{-12}	8×10^{-14} to 2×10^{-14}	8×10^{-13} to 5×10^{-14}
Aging/year	$< 1 \times 10^{-10}$ to 5×10^{-10}	None, by definition. However, the frequency of a cesium oscillator drifts by a small amount (typically by parts in 10^{17} over the course of a day).	None, the output is steered to compensate for aging and frequency drift.
Phase noise (dbc/Hz, 10 Hz from carrier)	-90 to -130	-130 to -136	-90 to -140
Life expectancy	> 15 years	5 to 20 years; 10 years is typical	> 15 years
Produces an ontime pulse without being synchronized to another source?	No	No	Yes
Produce frequency accurate to within $\pm 1 \times 10^{-11}$ for 24 hours or longer?	Yes, with periodic adjustment	Yes	Yes
Cost (USD)	\$2,000 to \$10,000	\$30,000 to \$75,000	\$3,000 to \$15,000

Oscilátor

Zesilovač

- Dodává energii výstupu
- Hradí ztráty v obvodu (perpetuum mobile zatím nemáme)
- Tranzistor, operační zesilovač, ...



Kladná zpětná vazba

- Je potřeba „šťouchnout“ ve správnou chvíli aby se kmity podporovaly a netlumily

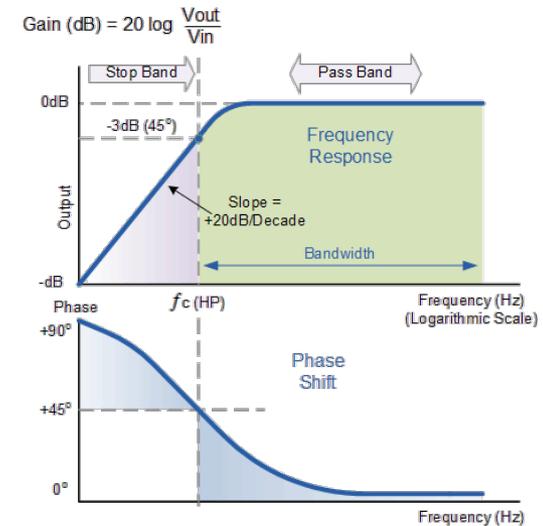
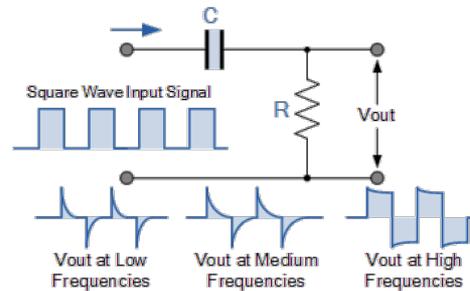
Kde to kmitá? (harmonický oscilátor)

- Zisk zesilovače \approx ztráty
- Celkový fázový posun = 0

RC oscilátor

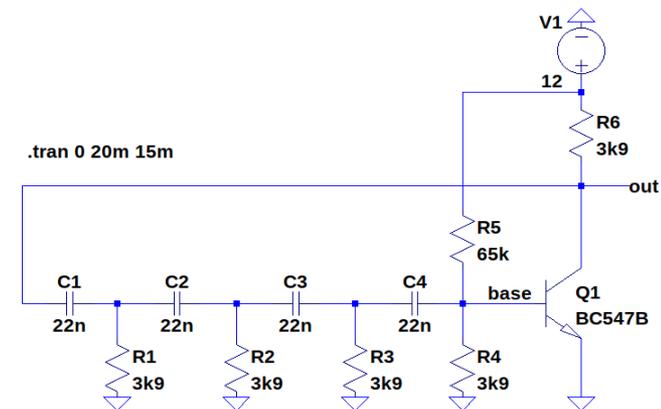
RC obvod

- Mezní kmitočet
 - Frekvence = $1/(2\pi RC)$
 - Útlum 3dB
 - Fáze = $+45^\circ$



4x RC obvod + invertující zesilovač

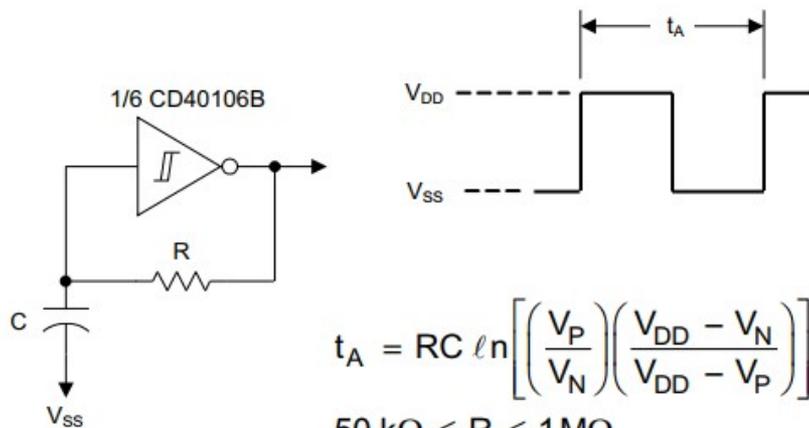
- Fáze = $4 \cdot 45^\circ - 180^\circ = 0^\circ$
- Frekvence $\approx 1/(2 \cdot \pi \cdot R \cdot C) = 1.8\text{kHz}$
 - RC zatížený => reálná frekvence nižší



RC oscilátor

RC obvod + invertor

- Obdelníkový výstup



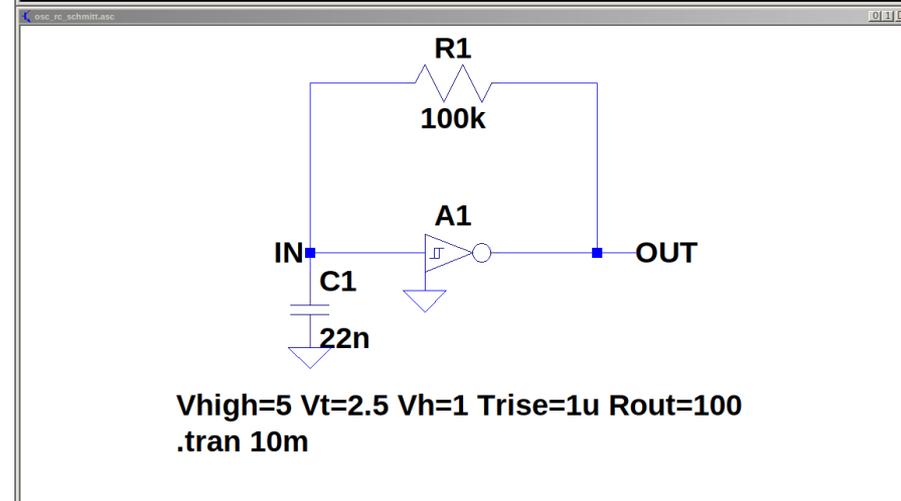
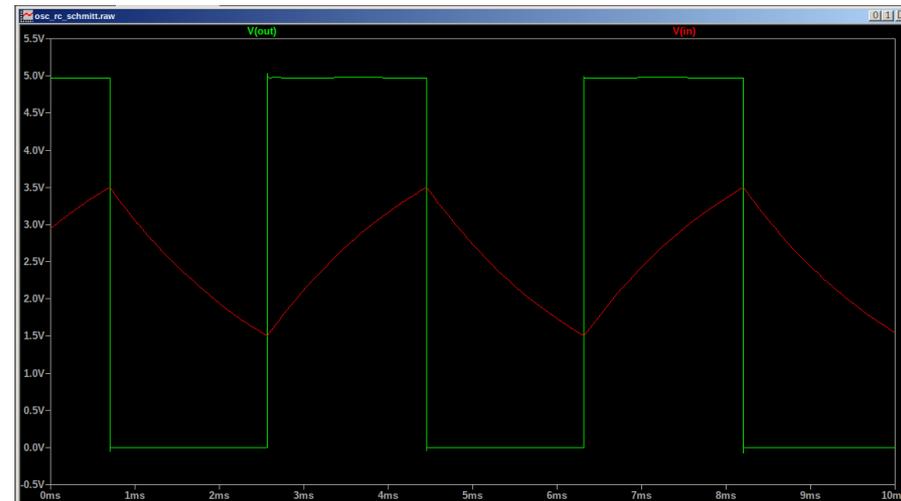
$$t_A = RC \ln \left[\left(\frac{V_P}{V_N} \right) \left(\frac{V_{DD} - V_N}{V_{DD} - V_P} \right) \right]$$

$$50 \text{ k}\Omega \leq R \leq 1 \text{ M}\Omega$$

$$100 \text{ pF} \leq C \leq 1 \mu\text{F}$$

For the Range of R and C
Given $2 \mu\text{s} < t_A < 0.4 \text{ s}$

Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated



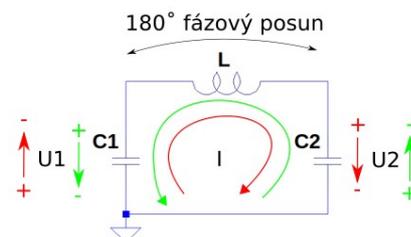
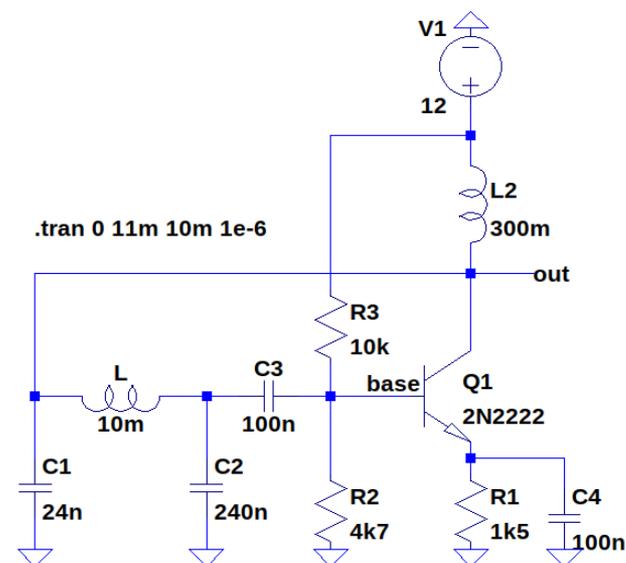
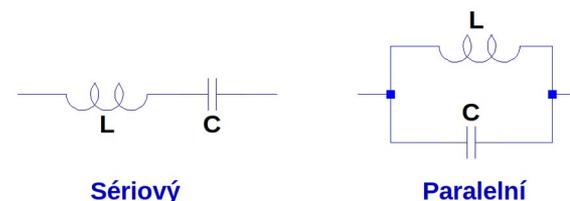
LC oscilátor

LC obvod

- Energie osciluje mezi L a C
- Rezonance $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

Paralelní LC + invertující zesilovač

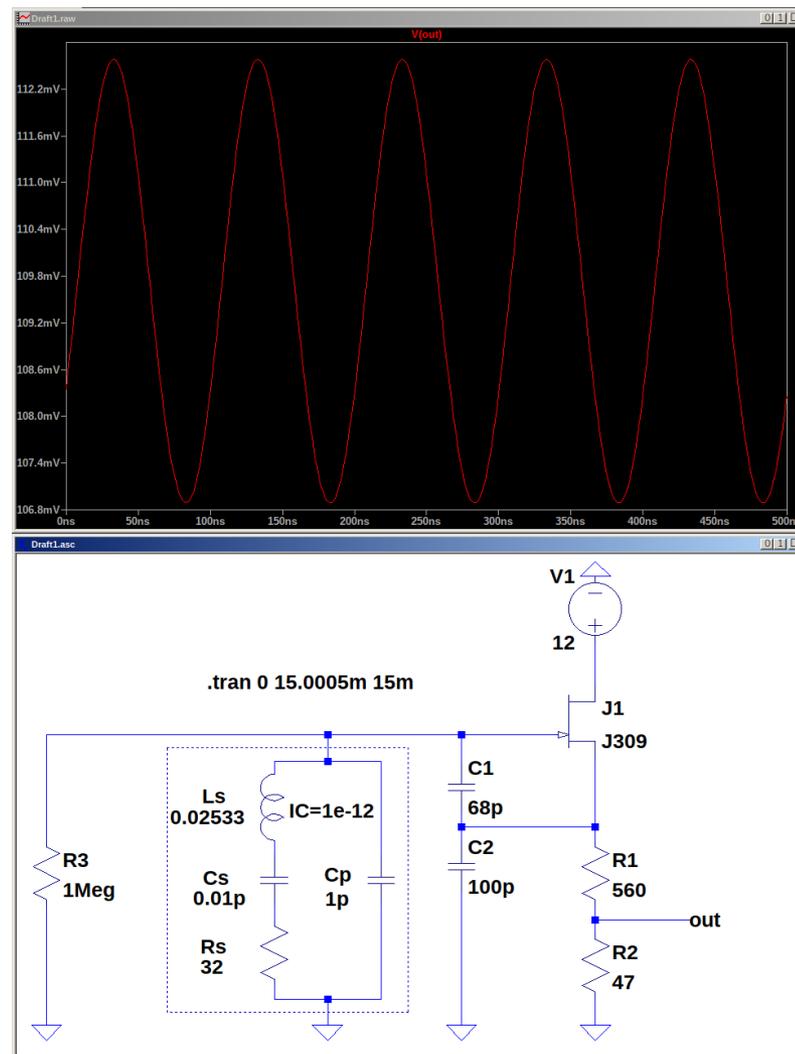
- C rozdělen na C1 a C2 sériově
 $C = (C1 * C2) / (C1 + C2) \approx 21.8 \text{ nF}$
- $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \text{ mH} * 21.8 \text{ nF}}} = 10.8 \text{ kHz}$



Krystalový oscilátor (XO)

Oscilátor

- Obdobná zapojení jako pro LC



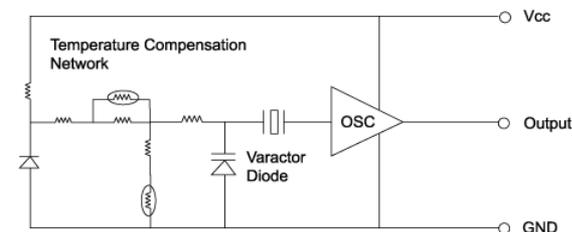
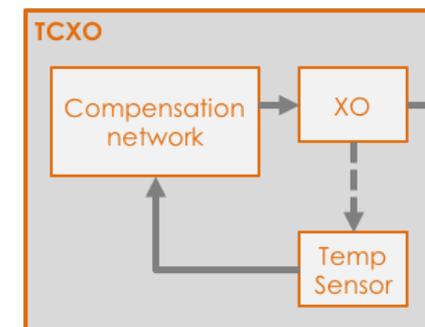
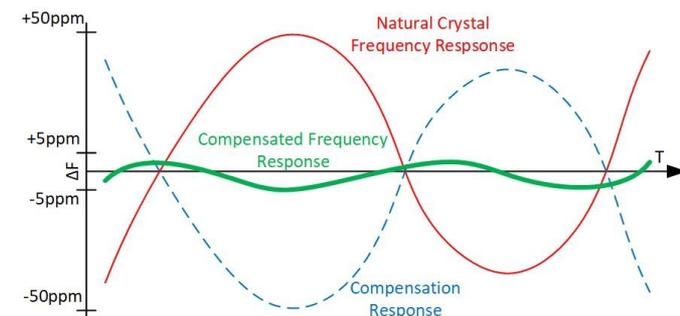
Krystalový teplotně kompenzovaný oscilátor (TCXO)

Princip

- Známa teplotní závislost (návrh/kalibrace)
- Vnitřní teplota měřena snímačem
- Oscilátor doladován dle aktuální teploty
 - } Pasivní kompenzační síť
 - } Lookup tabulka

Vlastnosti

- Dobrá stabilita: 0.1 – 1 ppm
- Nízká spotřeba: 1 – 100 mW
- Rychlý start: jako běžný XO



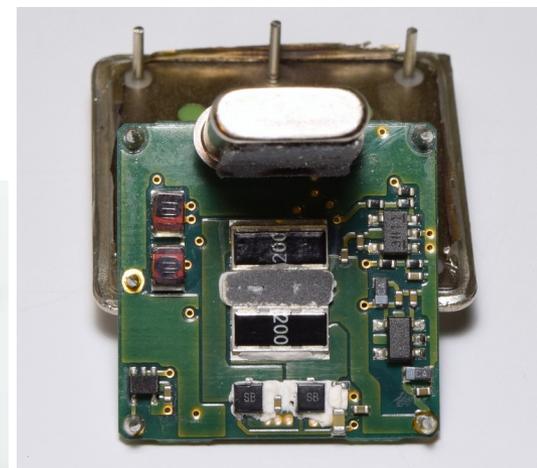
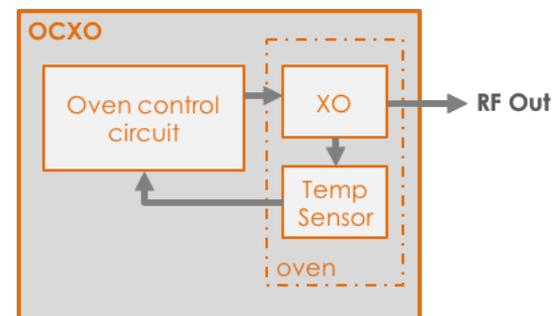
Termostatovaný krystalový oscilátor (OCXO)

Princip

- Interně vyhříván na konstantní teplotu
 - } Typicky max provozní $+10^{\circ}\text{C}$

Vlastnosti

- Vysoká stabilita: 1 – 100 ppb
- Vysoká spotřeba: 0.2 – 5W
- Pomalý start: 1 – 10 min



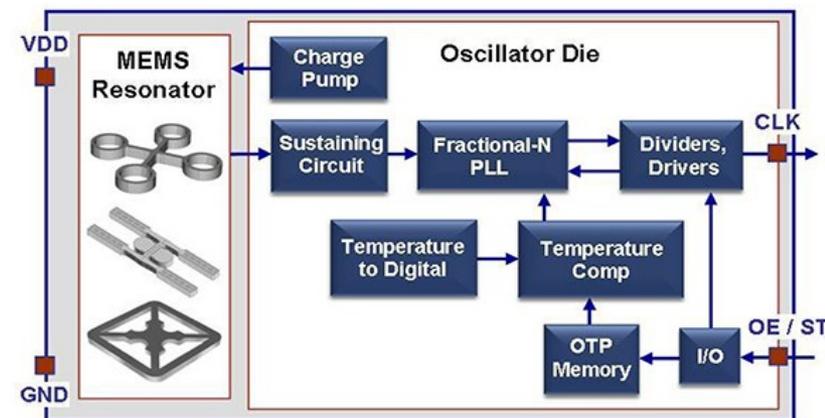
MEMS oscilátor

Princip

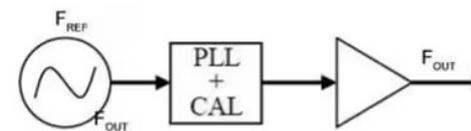
- Mechanický rezonátor “na křemíku”
 - } Q faktor $\approx 100k$ (vakuum)
- Frakční PLL
- Teplotní kompenzace

Vlastnosti

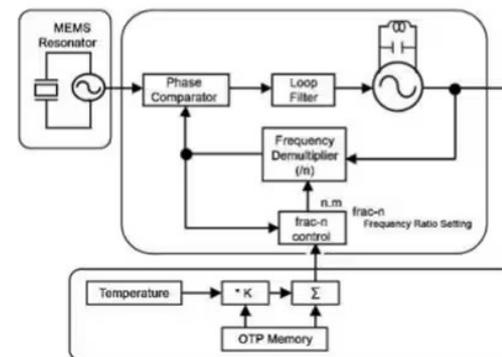
- Dobrá stabilita: až 0.5 ppm
- Programovatelná frekvence
 - } Vysoké rozlišení



MEMS Oscillator



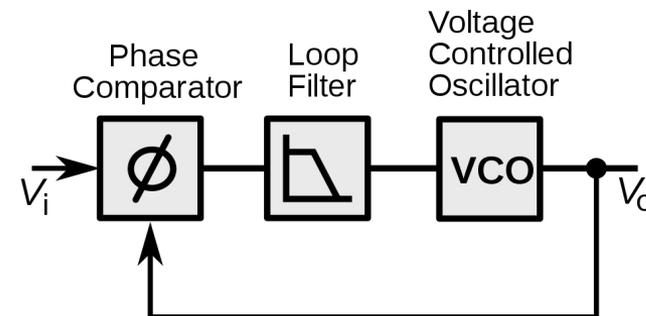
MEMS Oscillator Basic Structure



Fázový závěs (PLL)

Základní princip

- Napětím řízený oscilátor (VCO)
 - › Zajišťuje frekvenční rozsah
- Fázový komparátor
 - › Převádí rozdíl fáze (frekvence) na napětí
- Filtr smyčky
 - › Určuje šířku pásma PLL
(jak rychle dokáže sledovat změny frekvence V_i)

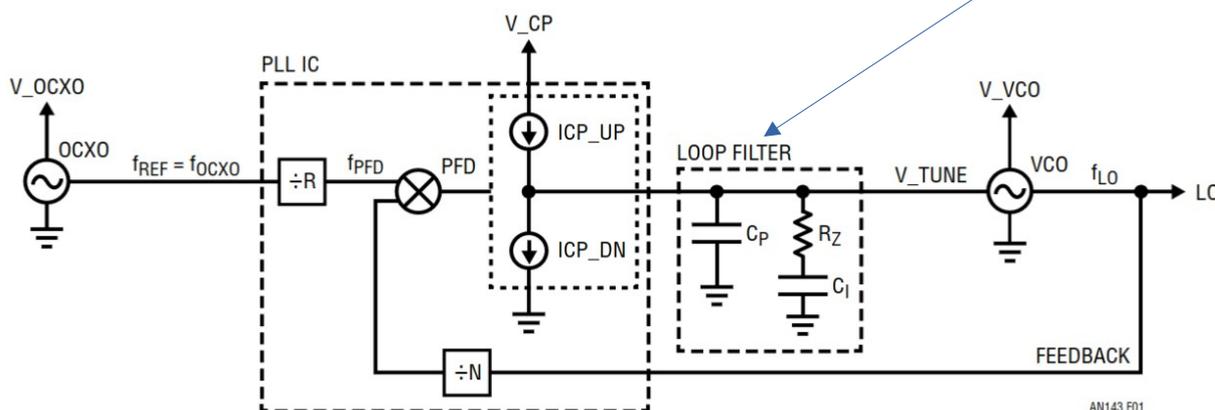
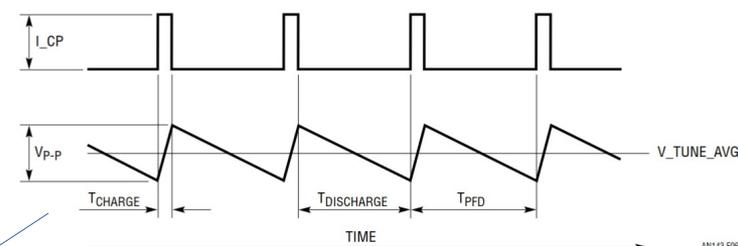


VCO se řídí ve zpětné vazbě aby sledovalo vstup V_i

Frekvenční syntéza s PLL (celočíselná)

Základní princip

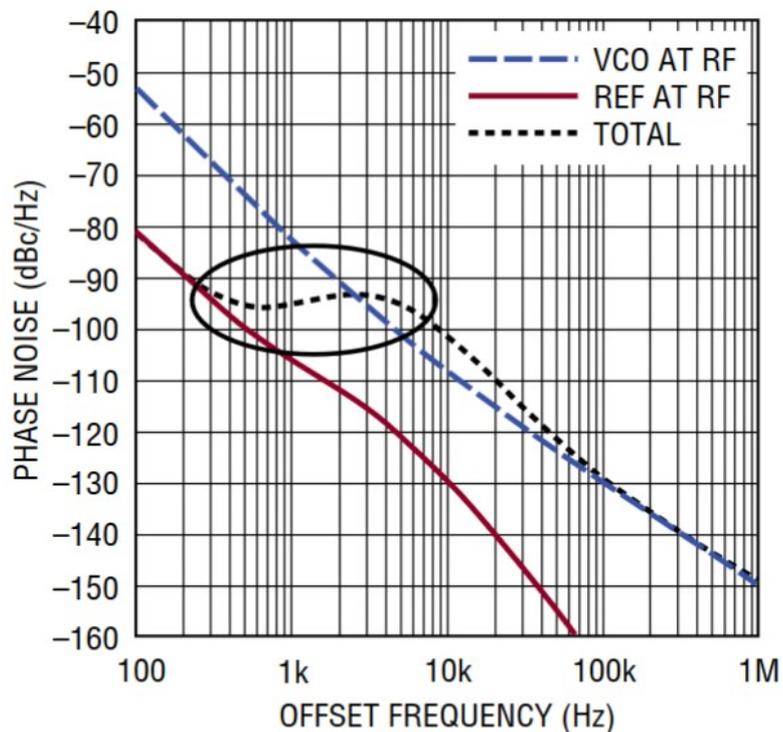
- Referenční oscilátor
 - } Dodává přesnost a dlouhodobou stabilitu
 - } Typicky XO, TCXO, OCXO
- Nastavitelné děličky R a N
 - } Určují výstupní frekvenci $f_{LO} = f_{REF} * N / R$
 - } Relativně hrubý frekvenční krok



Frekvenční syntéza s PLL (celočíselná)

Fázový šum

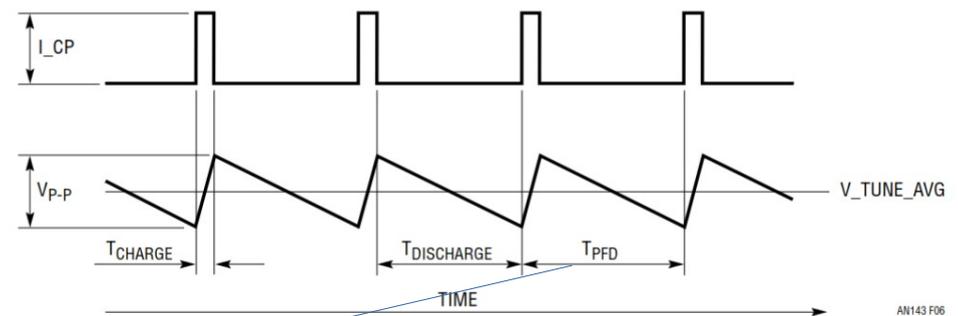
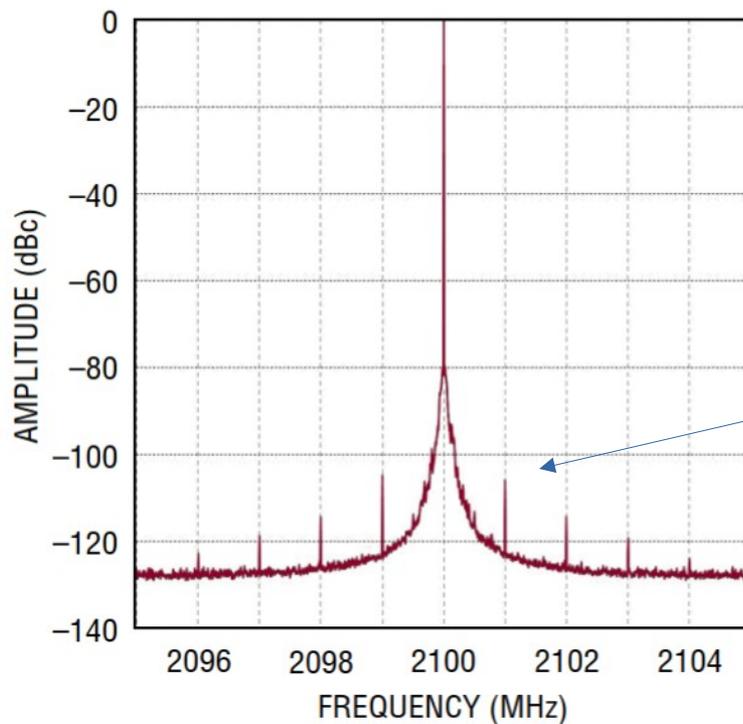
- Offset < šířka pásma PLL => fázový šum ref. Oscilátoru * **N**
- Offset > šířka pásma PLL => fázový šum VCO



Frekvenční syntéza s PLL (celočíselná)

Spektrum

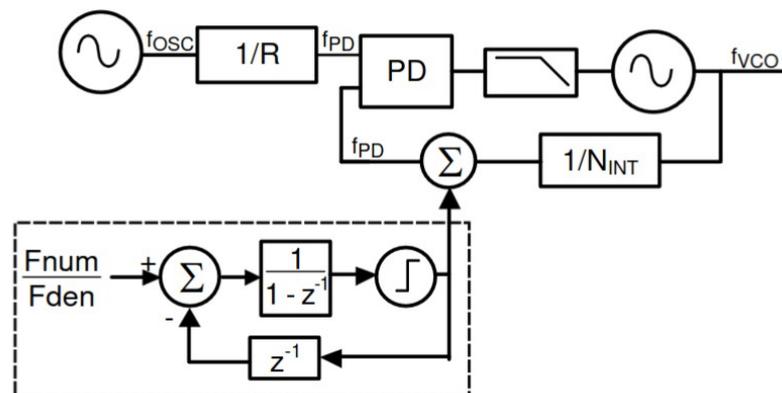
- Spury



Frekvenční syntéza s PLL (frakční)

Základní princip

- $f_{VCO} = f_{OSC} * (F_{num}/F_{den}) * N / R$
- Lepší frekvenční krok
- Nižší fázový šum (nižší N)
- Více spurů



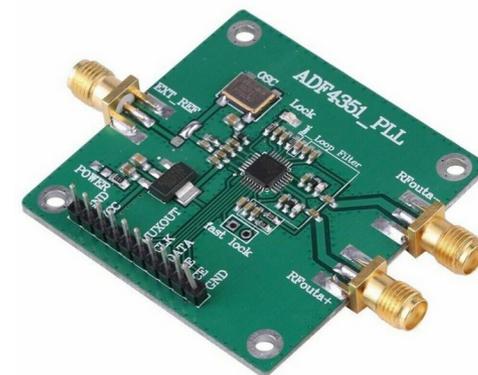
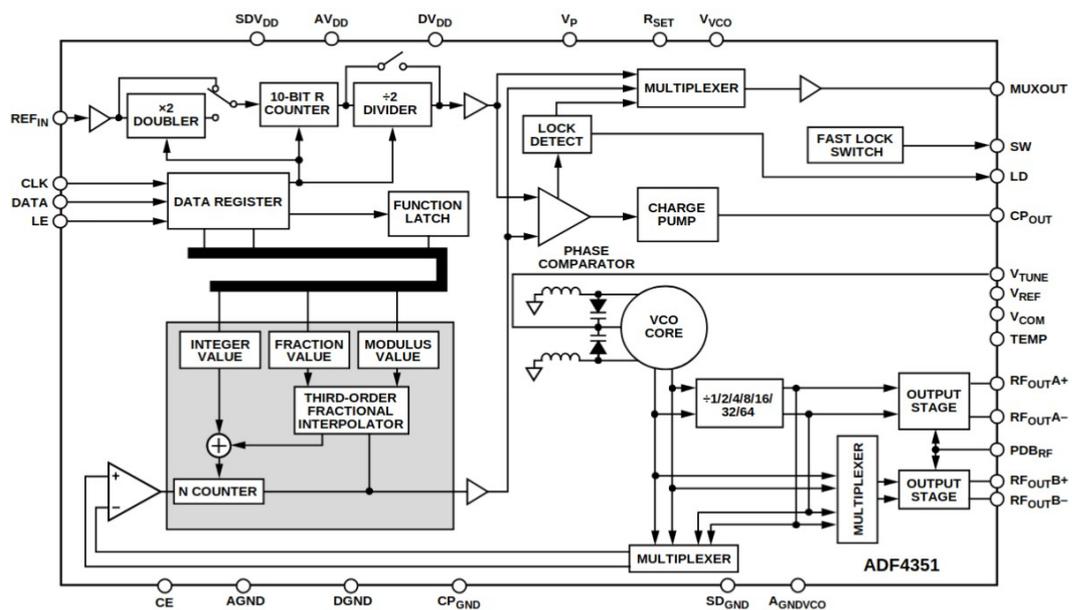
<https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-086.pdf>

<https://www.ti.com/lit/an/sn0062b/sn0062b.pdf?ts=1709487953292>

Frekvenční syntéza s PLL (frakční)

ADF4351

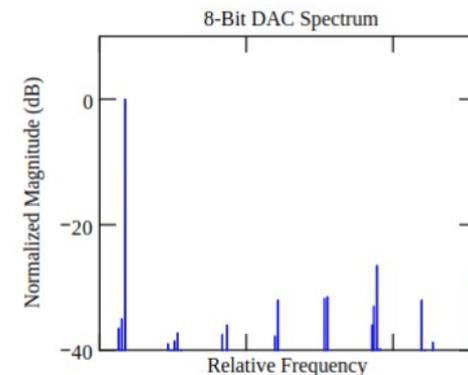
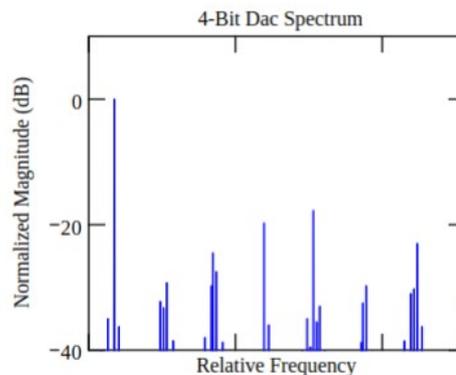
- 35 MHz až 4.4 GHz
- Znáte z Aliexpressu ...



Přímá digitální syntéza (DDS)

Vlastnosti

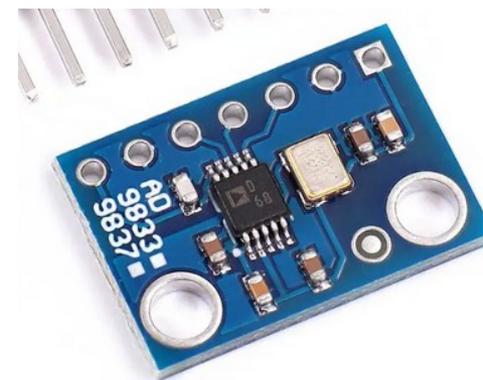
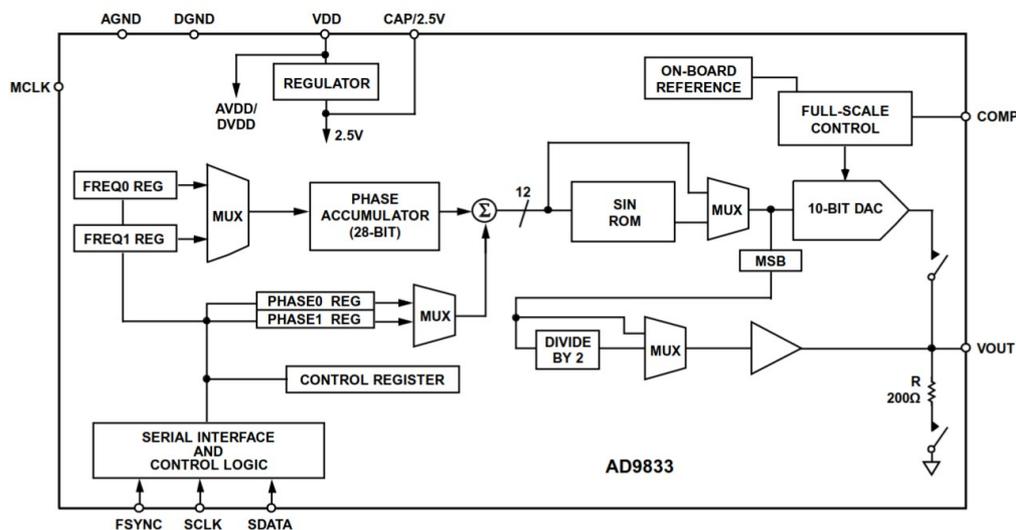
- Nízký fázový šum blízko nosné (závisí na referenčním oscilátoru)
- Rychlá změna frekvence/fáze
- Více kanálů (generování I/Q)
- Široká přeladitelnost a velké rozlišení
 - } Min. frekvence = DC
 - } Max frekvence $F_c/2$
 - } Rozlišení = $F_c/2^N$
- Více spurů než PLL
 - } Závisí na nastavené frekvenci
 - } Aliasing
 - } Rozlišení DAC
 - } Dithering



Přímá digitální syntéza (DDS)

AD9833

- Max 12.5 MHz, 10 bit
- Znáte z Aliexpressu (60Kč)



Rubidiový frekvenční standard

Izotop Rubidium-87

- Přejchod mezi stavy elektronu 5S
6 834 682 610.904 Hz

Základní princip

- Světlo prochází plynem Rb-87 a dopadá na fotodetektor
- Kavita s Rb-87 buzena RF signálem
- Intenzita detekovaného světla závisí na frekvenci RF pole
- Rezonance na 6 834 682 610.904 Hz

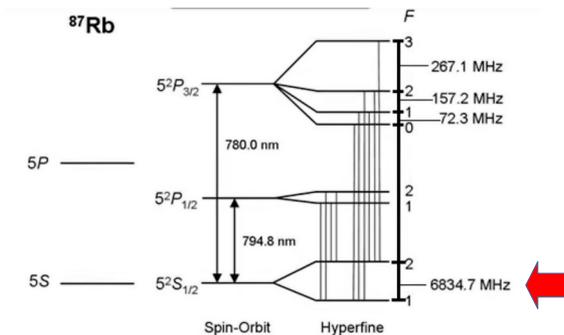


Figure 1. Energy level diagram for ^{87}Rb . The frequency spacing between adjacent levels is shown for the hyperfine splitting.

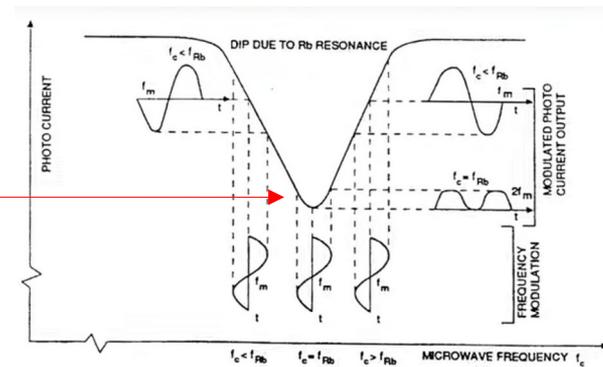
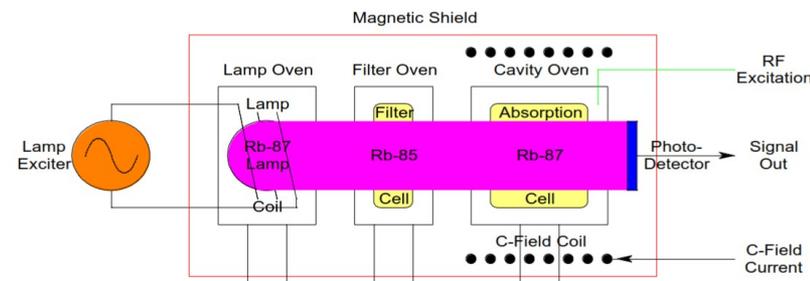
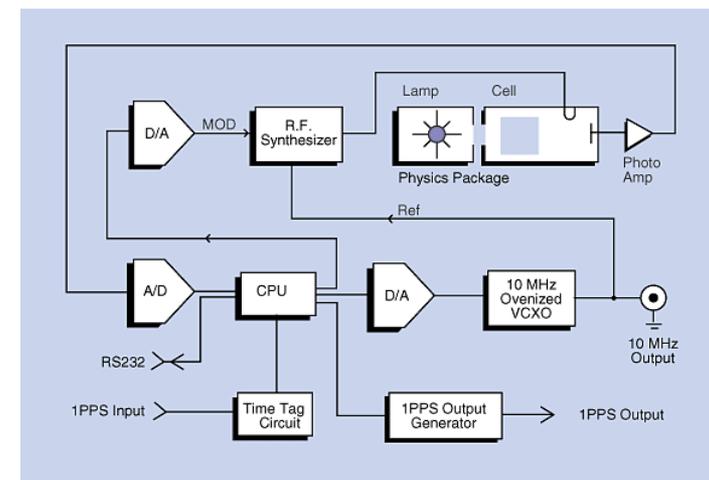
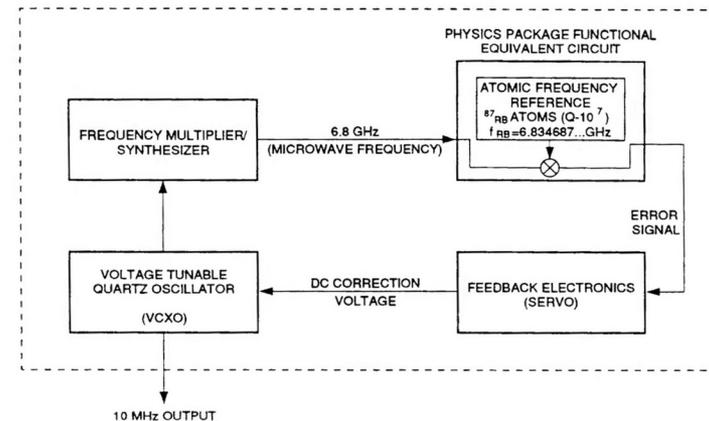


Figure 3-3. Derivation of Modulation Signal

Rubidiový frekvenční standard

Rb disciplinovaný oscilátor

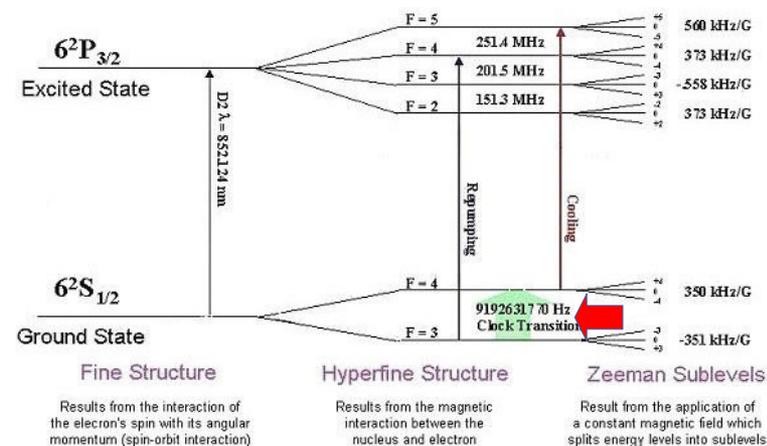
- Krystalový oscilátor (10 MHz)
- Násobička na Rb frekvenci
- Budí mikrovlnné pole v Rb kavitě
- XO zpětnovazebně doladován dle intenzity na fotodetektoru



Cesiový frekvenční standard

Izotop Cesium-133

- Isidor Isaac Rabi
Nobelova cena 1944
- Hyperfinite transition frequency
9 192 631 770 Hz



Základní principy / typy

- Beam
- Fountain

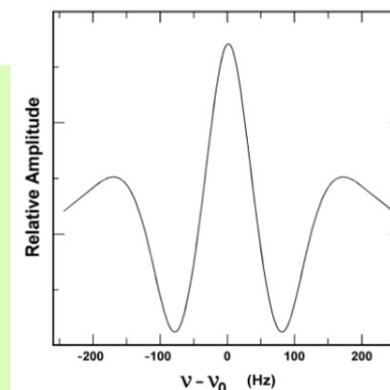
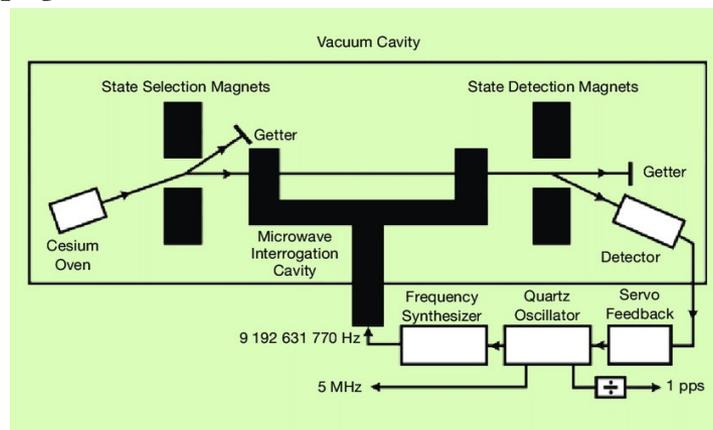
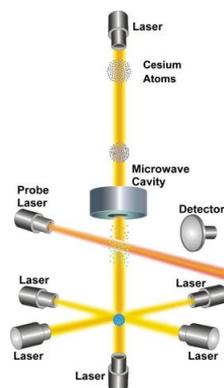


Fig. 2. NIST-7 Ramsey pattern ($F = 3 \leftrightarrow F = 4$) transition in the ground state). The central fringe has a full linewidth at half maximum of about 65 Hz.

Cesiový frekvenční standard

HP 5061A – 1961, experimentální důkaz teorie relativity

- Hafele-Keating experiment
- 2x kolem světa (6 dnů)
 - Komerční lety
 - Východním směrem
 - Západním směrem
- Porovnání se stacionárními
- **< 10% odchylka od teorie**



The results were published in *Science* in 1972:^{[5][6]}

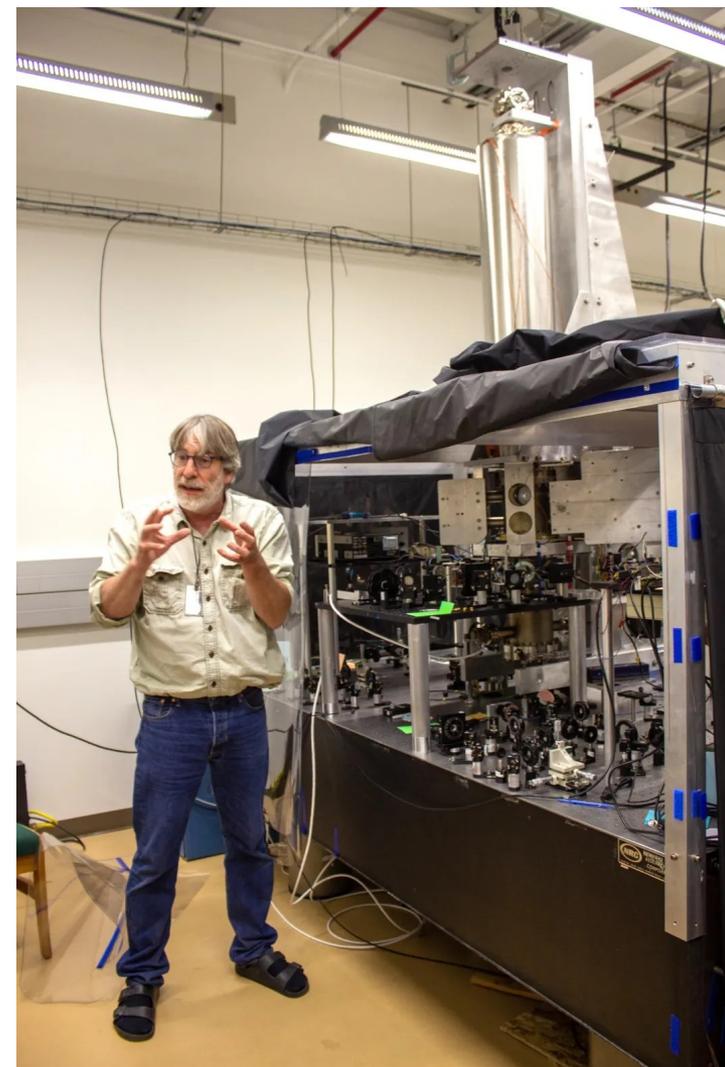
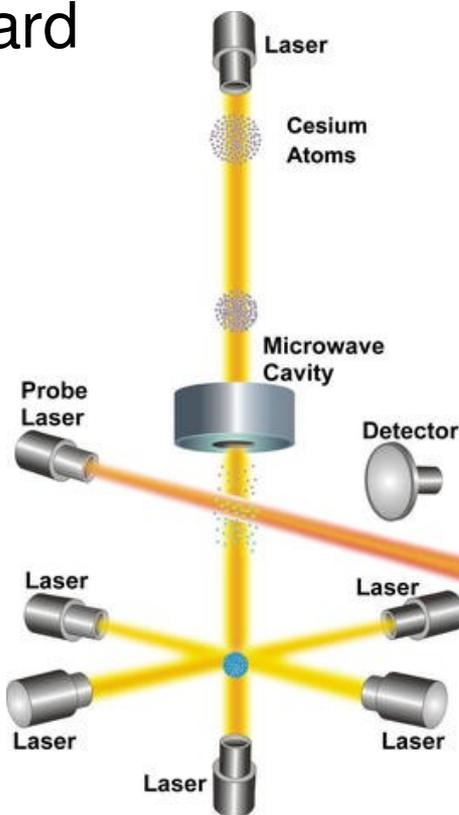
	nanoseconds gained, predicted			nanoseconds gained, measured	difference
	gravitational (general relativity)	kinematic (special relativity)	total		
eastward	+144 ±14	-184 ±18	-40 ±23	-59 ±10	0.76 σ
westward	+179 ±18	+96 ±10	+275 ±21	+273 ±7	0.09 σ

The published outcome of the experiment was consistent with both special and general relativity. The observed time gains and losses were in agreement with relativistic predictions to within the ~10% precision expected of the experiment.^[7]

Cesiový frekvenční standard

NIST F1

- Fountain
- US primární standard
- Nejistota 10^{-16}



OTÁZKY?
