



Seminár na pondelok

Analógovo číslicové prevodníky, číslicové spracovanie signálov (úvod do úvodu)

Peter Adamec, Adam Lassak, Jaromír Sukuba, Juraj Tvarožek,
Daniel Valúch, Ján Waclawek

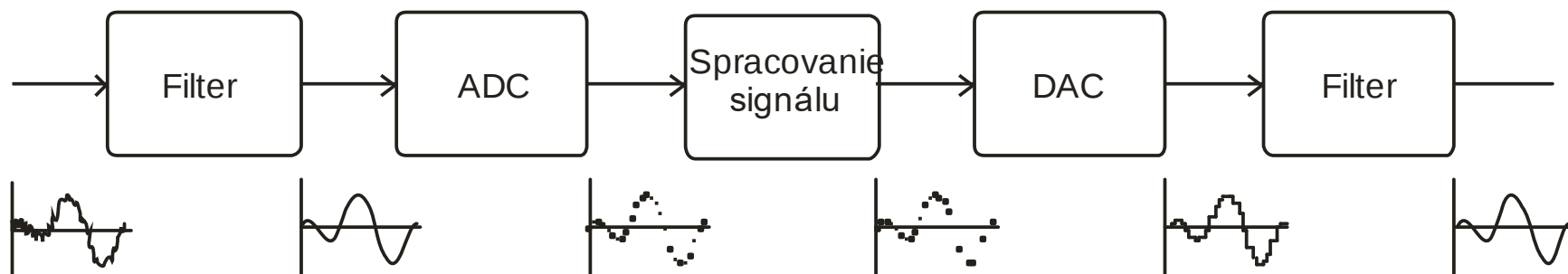
17. - 20. marec 2025, SPŠ IT, Kysuské Nové Mesto

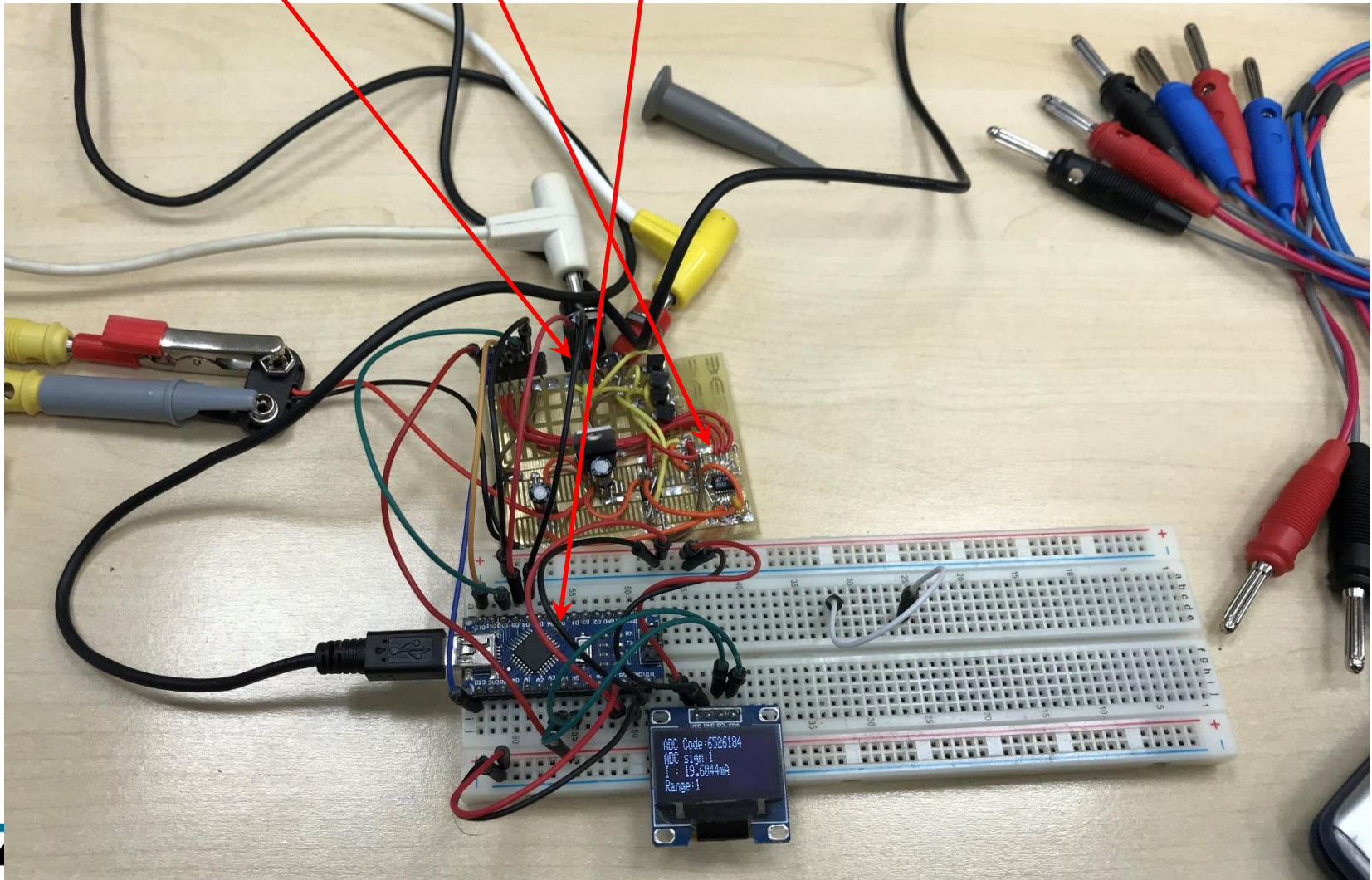
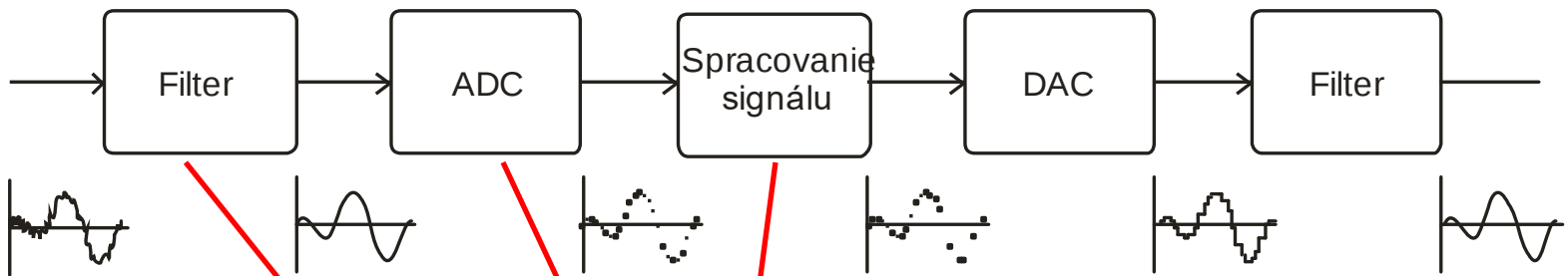
Číslicové meranie

- S meranou veličinou sa pracuje ako s číslom
- Eliminujú sa obmedzenia práce s analógovými signálmi
 - napr. šum, nízke/vysoké úrovne, offset, drift, komplikované matematické operácie, žiadna pamäť
- Vzniknú ale iné obmedzenia súvisiace s diskretnou formou signálu - napr. konečný dynamický rozsah, šírka pásma, oneskorenie
- Výhody číslicového spracovania ale jednoznačne prevládajú
 - Možnosť využitia aj zložitých algoritmov a zložitých matematických operácií, filtrácia, kalibrácia, linearizácia, záznam dát, diaľkové meranie...
- Súčasné meracie systémy sú takmer výhradne digitálne

Číslicové meranie

- Základom je prevod medzi spojitou (analógovou) veličinou a diskretnou (číslíkovou/digitálnou) veličinou
- Funkciu realizuje analógovo-číslíkový prevodník – Analog to Digital Converter (ADC) alebo Číslíkovo-analógový prevodník – Digital to Analog Converter (DAC)





Úprava úrovne

Filter

ADC 16-bit, 120Mps

Číslkové spracovanie
signálu Xilinx ARTIX7

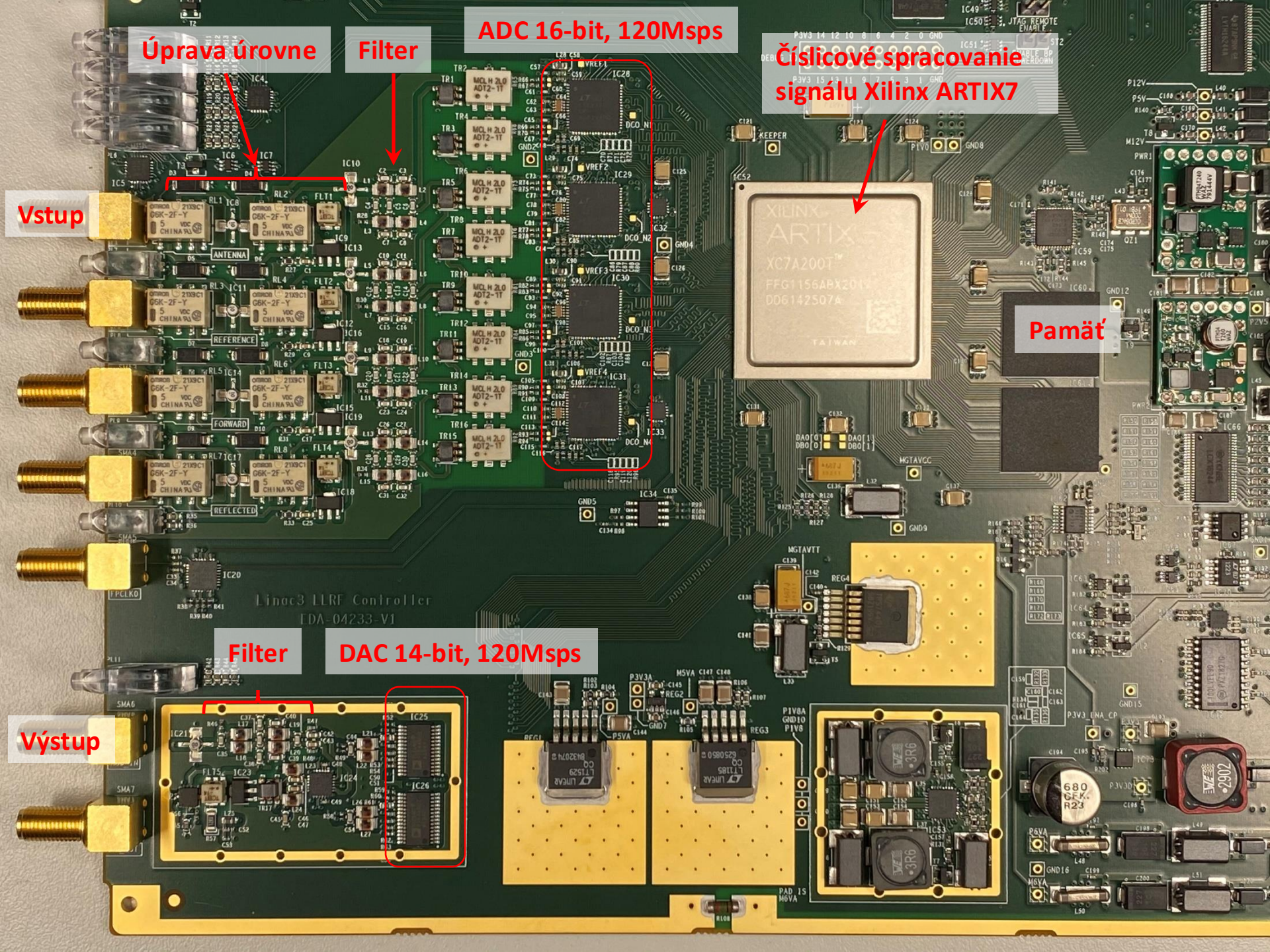
Pamäť

Filter

DAC 14-bit, 120Mps

Vstup

Výstup



AD prevod

- Analógovo číslicový prevod vyjadří hodnotu meranej veličiny ako pomer k hodnote použitej referencie (racionálny násobok)



$$U_{merané} = \frac{N}{2^n} U_{referencia}$$

$$N = \text{round}\left(\frac{U_{merané}}{U_{referencia}} 2^n\right)$$

kde:

N – číslo z AD prevodníka

n – počet bitov AD prevodníka



AD prevod – 3 kroky

1. Vzorkovanie

- Diskretizácia signálu v čase

2. Kvantovanie

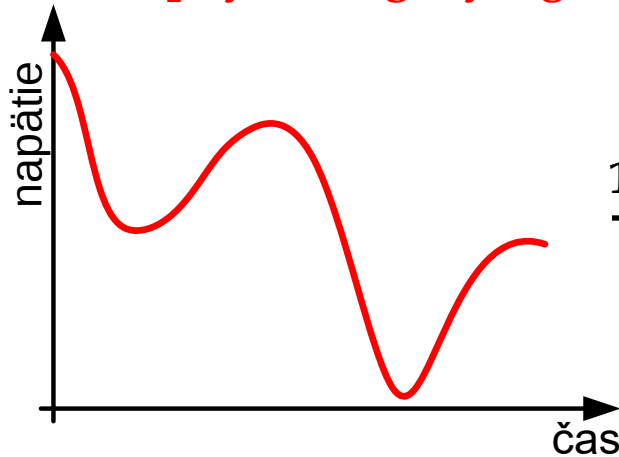
- Diskretizácia signálu v amplitúde

3. Kódovanie

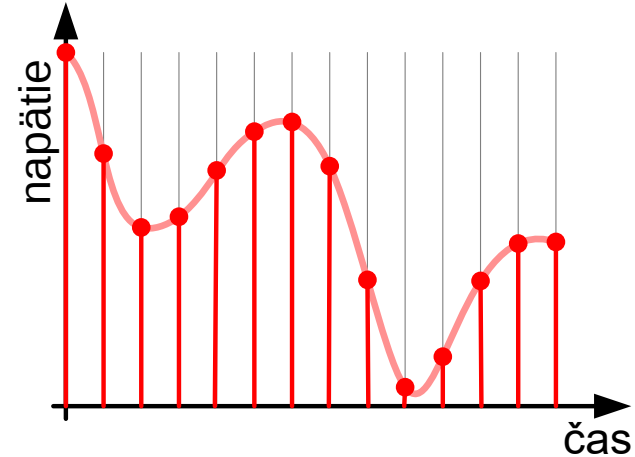
- Pridelenie kódu danej úrovni

AD prevod – 3 kroky:

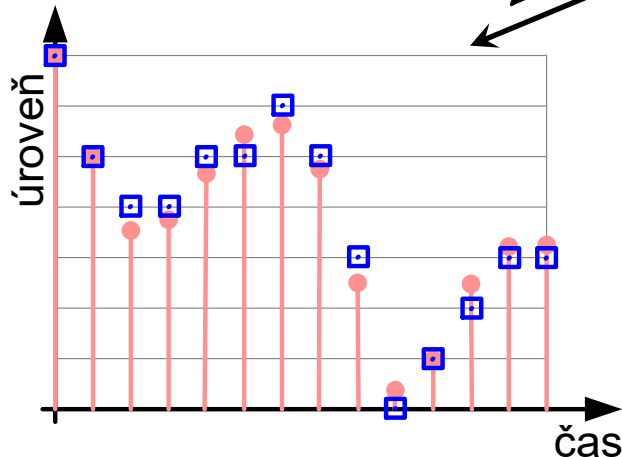
Vstupný analógový signál



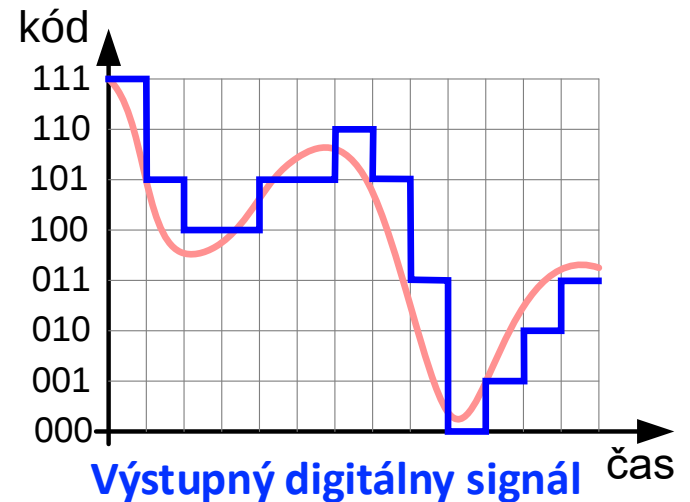
1. vzorkovanie



2. kvantovanie



3. kódovanie

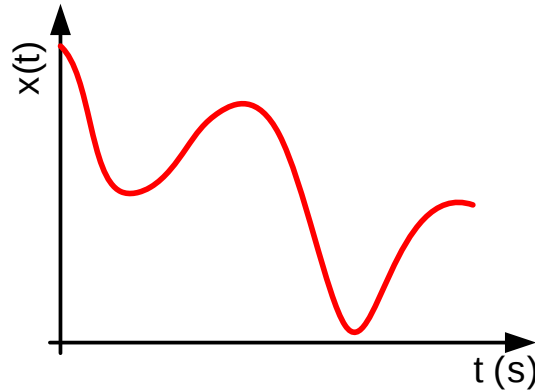


Výstupný digitálny signál

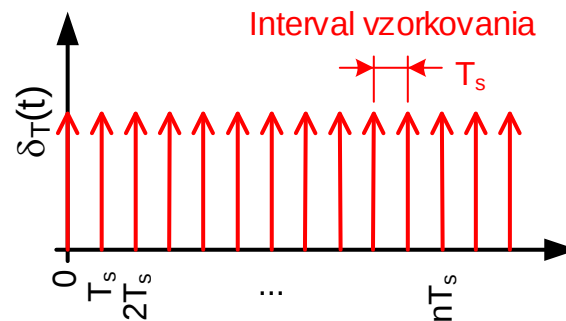
$x[n] = 111, 101, 100, 100, 101, 101, 110,$
 $101, 011, 000, 001, 010, 011, 011$

1. Vzorkovanie

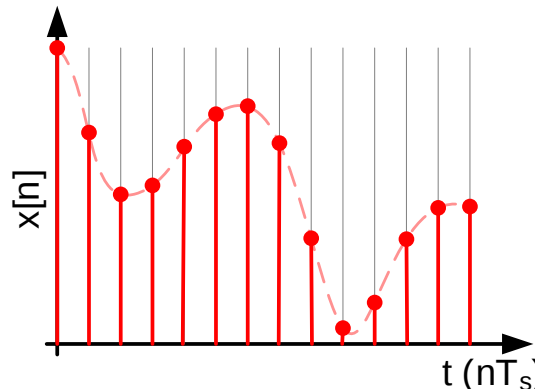
- Prevod signálu spojitého v čase na signál diskretný v čase



Vstupný analógový signál spojitý v čase a spojitý v hodnote $x(t)$



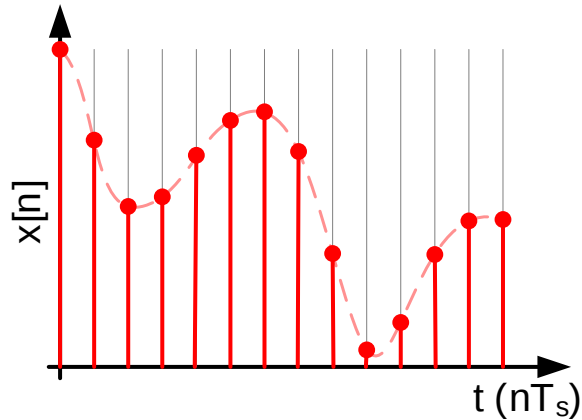
Vzorkovacia postupnosť $\delta_T(t)$



Navzorkovaný signál diskretný v čase, stále spojitý v hodnote
 $x[n] = x(nT_s) \delta_T(nT_s)$

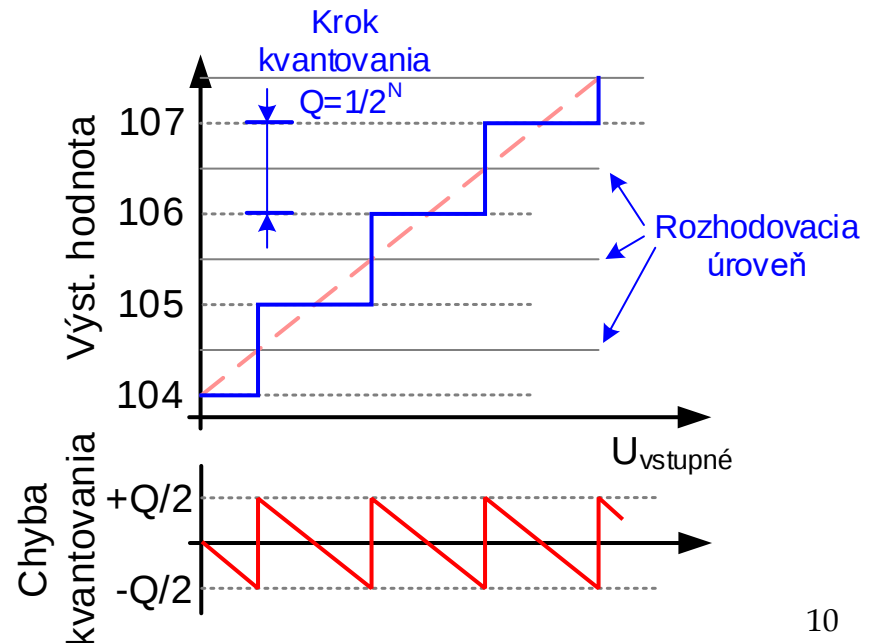
2. Kvantovanie

- Prevod signálu spojitého v hodnote na signál diskretný v hodnote



Navzorkovaný signál diskretný v čase, ale stále spojitý v hodnote

Kvantovanie priradí vstupnému spojitému intervalu hodnôt Q práve jednu výstupnú hodnotu.

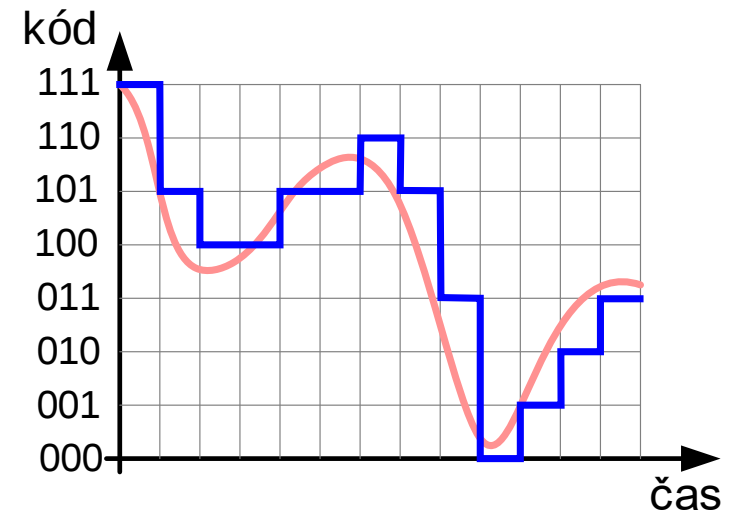


3. Kódovanie

- Priradenie definovaného kódu každej kvantizačnej úrovni

Kvantizačná úroveň	Výstupný kód „offset binary“	Výstupný kód „two's complement“
0	000	100
1	001	101
2	010	110
3	011	111
4	100	000
5	101	001
6	110	010
7	111	011

Príklad prevodovej tabuľky lineárneho kódera pre 8 úrovní



$x[n] = 111, 101, 100, 100, 101, 101, 110, 101, 011, 000, 001, 010, 011, 011$

Vzorkovacia frekvencia

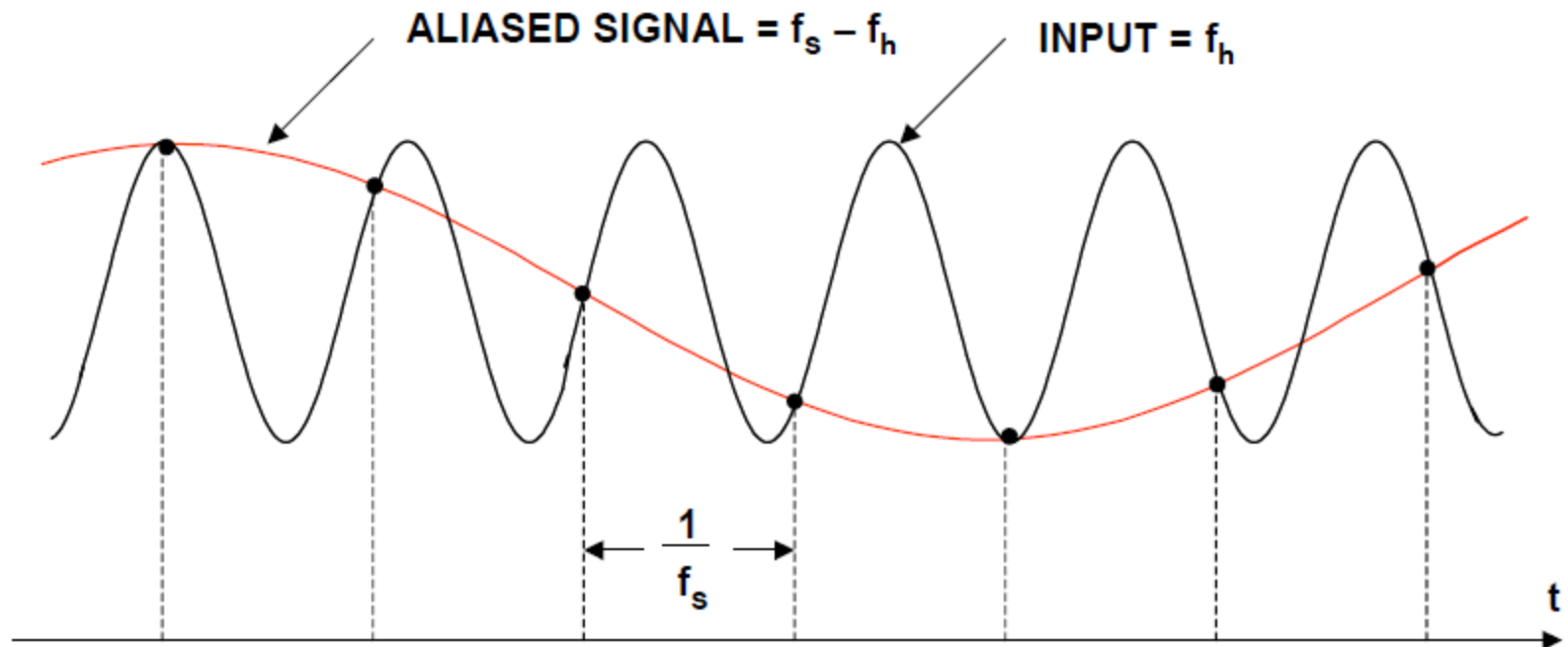
- Kontinuálny signál môže byť reprezentovaný vzorkami a spätne zrekonštruovaný bez straty informácie, ak bude vzorkovacia frekvencia f_s vyššia ako dvojnásobok maximálnej frekvencie f_h obsiahnutej v tomto signále

$$f_s > 2 f_h$$

- Teória nezávisle postulovaná niekoľkými matematikmi Nyquist, Shannon, Whittaker, Koteľnikov, Raabe, Someya (circa 1920-1930)

Vzorkovacia frekvencia – aliasing

- Aliasing nastáva ak nie sú splnené podmienky vzorkovacej teorémy. Pôvodná informácia je v navzorkovanom signále nenávratne stratená



Parametre kvantovania

- Počet bitov prevodníka n
- Rozlišovacia schopnosť – Resolution (N)

$$N = 2^n \quad \text{pre } n\text{-bitový prevodník}$$

- Vstupný rozsah – Range, Full Scale (FS)

$$FS = U_{max} - U_{min}$$

- Krok kvantovania – quantum (q), Least Significant Bit (**LSB**)

$$Q = \frac{FS}{N} = \frac{FS}{2^n}$$

Parametre kvantovania

- Príklad 8-bitový AD prevodník s rozsahom $+/-5V$

- Počet bitov $n = 8$

- Rozlišovacia schopnosť – Resolution (N)

$$N = 2^n = 2^8 = 256 \text{ úrovní}$$

- Vstupný rozsah – Range, Full Scale (FS)

$$FS = U_{max} - U_{min} = +5 - (-5) = 10 \text{ V}$$

- Krok kvantovania – quantum (q), Least Significant Bit (LSB)

$$Q = \frac{FS}{N} = \frac{FS}{2^n} = \frac{10 \text{ V}}{256 \text{ LSB}} = 0.0390625 \text{ V/LSB}$$

Kódovanie

- Priradenie definovaného kódu každej kvantizačnej úrovni
- Väčšinou Offset binary, Two's complement, Gray kód. Niekedy BCD kód.
- Výstupný formát: Sériová zbernica (I2C, SPI), paralelná binárna zbernica, paralelná DDR zbernica, JESD link
- Výstupné úrovne: CMOS, LVCMOS, LVDS...

BASE 10 NUMBER	SCALE	±5V FS	OFFSET BINARY	TWOS COMP.	ONES COMP.	SIGN MAG.
+7	+FS – 1LSB = +7/8 FS	+4.375	1 1 1 1	0 1 1 1	0 1 1 1	0 1 1 1
+6	+3/4 FS	+3.750	1 1 1 0	0 1 1 0	0 1 1 0	0 1 1 0
+5	+5/8 FS	+3.125	1 1 0 1	0 1 0 1	0 1 0 1	0 1 0 1
+4	+1/2 FS	+2.500	1 1 0 0	0 1 0 0	0 1 0 0	0 1 0 0
+3	+3/8 FS	+1.875	1 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
+2	+1/4 FS	+1.250	1 0 1 0	0 0 1 0	0 0 1 0	0 0 1 0
+1	+1/8 FS	+0.625	1 0 0 1	0 0 0 1	0 0 0 1	0 0 0 1
0	0	0.000	1 0 0 0	0 0 0 0	*0 0 0 0	*1 0 0 0
–1	– 1/8 FS	–0.625	0 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 0	1 0 0 1
–2	– 1/4 FS	–1.250	0 1 1 0	1 1 1 0	1 1 0 1	1 0 1 0
–3	– 3/8 FS	–1.875	0 1 0 1	1 1 0 1	1 1 0 0	1 0 1 1
–4	–1/2 FS	–2.500	0 1 0 0	1 1 0 0	1 0 1 1	1 1 0 0
–5	–5/8 FS	–3.125	0 0 1 1	1 0 1 1	1 0 1 0	1 1 0 1
–6	–3/4 FS	–3.750	0 0 1 0	1 0 1 0	1 0 0 1	1 1 1 0
–7	– FS + 1LSB = –7/8 FS	–4.375	0 0 0 1	1 0 0 1	1 0 0 0	1 1 1 1
–8	– FS	–5.000	0 0 0 0	1 0 0 0		

NOT NORMALLY USED
IN COMPUTATIONS (SEE TEXT)

	ONES COMP.	SIGN MAG.
* 0+	0 0 0 0	0 0 0 0
0–	1 1 1 1	1 0 0 0

Figure 2.9: Bipolar Codes, 4-bit Converter

Čas prevodu - **Acquisition time** - čas potrebný na uskutočnenie jedného prevodu

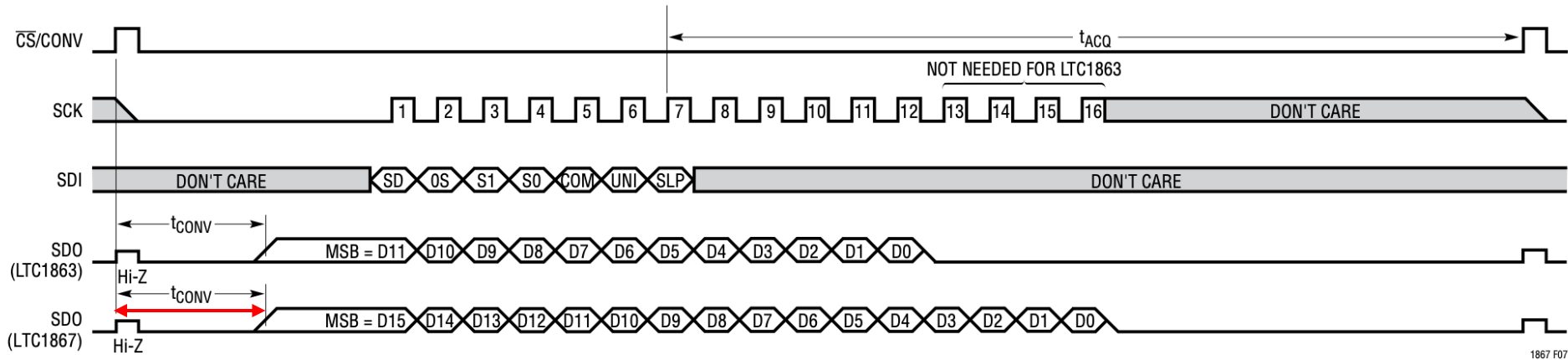
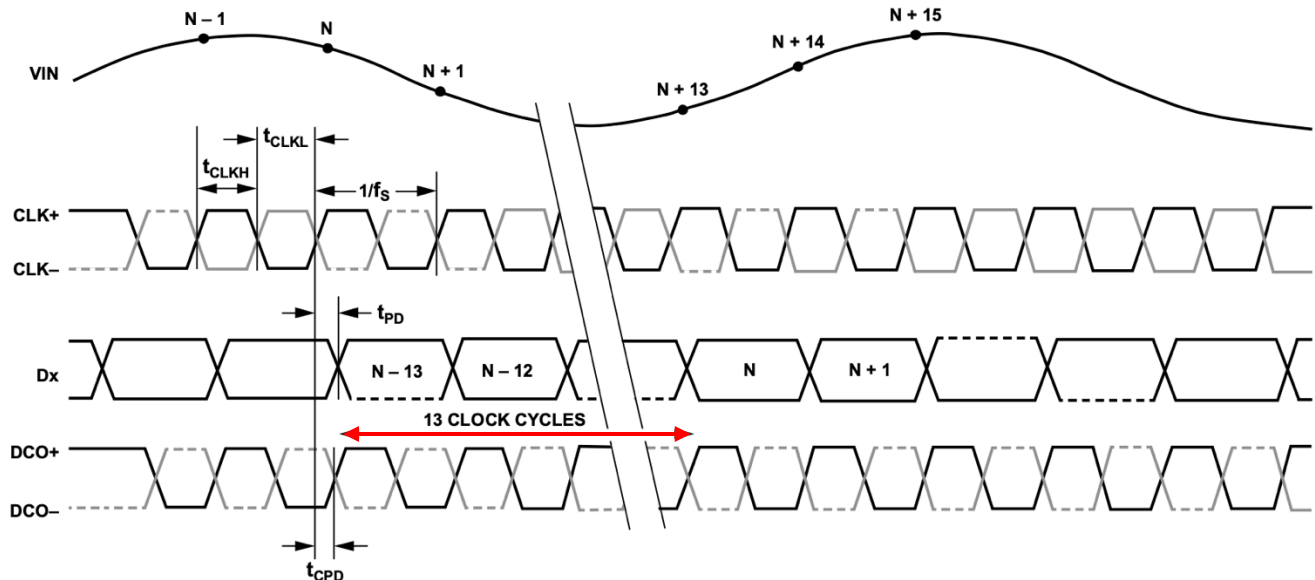


Figure 7. Example 2, $\overline{CS}/CONV$ Starts a Conversion With Short Active HIGH Pulse. With $\overline{CS}/CONV$ Returning LOW Before the Conversion, the ADC Remains Powered Up

Oneskorenie údajov - **Pipeline Delay** - oneskorenie v jednotkách cyklov prevodu medzi zosnímaním vzorky a kódom na výstupe



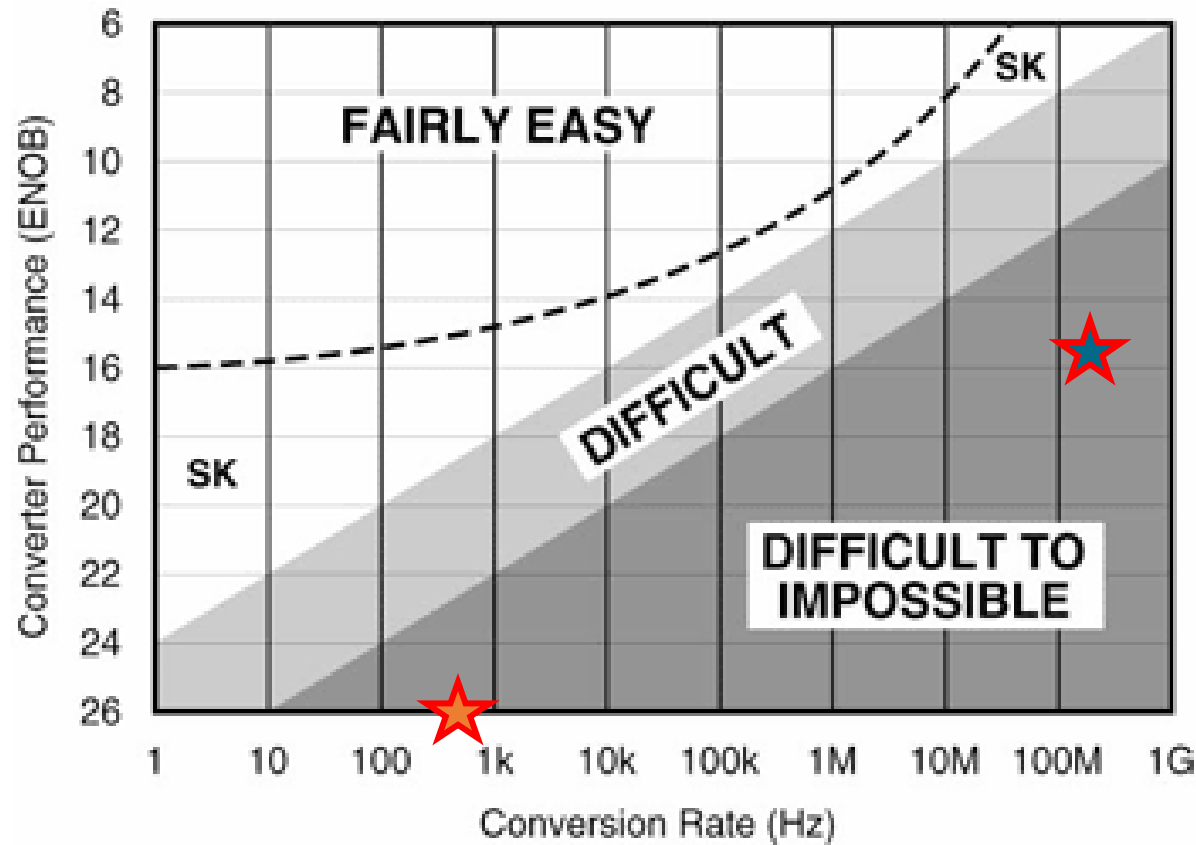
Dynamické vlastnosti AD prevodníka

- Maximálny pomer signál/šum pre ideálny ADC:

$$SNR(dB) = 6,02 \cdot n + 1.76$$

Počet bitov AD prevodníka	Počet rozlišovacích úrovní	Dynamický rozsah (dB)
4	16	28.8
6	64	37.8
8	256	49.9
10	1 024	61.9
12	4 096	74.0
16	65 536	98.0
20	1 048 576	122.2
24	16 777 216	146.2

Reálne limity AD prevodu



★ Beev Nikolai et.al.: Design and Metrological Characterization of a Digitizer for the Highest Precision Magnet Powering in the High Luminosity Large Hadron Collider

★ Valuch Daniel et.al.: New generation of very low noise beam position measurement system for the LHC transverse feedback

Reálne limity AD prevodu

Ďalšie čítanie napr.:

Boris Murmann, Department of Electrical Engineering, Stanford University

Energy Limits in A/D Converters

prezentácia (2012)

<https://indico.cern.ch/event/191624/attachments/273635/382982/murmann20120525cern.pdf>

Článok z IEEE (2013) <https://ieeexplore.ieee.org/document/6577781>

Jerry Horn: Practical Limits of Analog-to-Digital Conversion

<http://www.hit.bme.hu/~papay/edu/DSP/adc2000.htm>

Beev Nikolai et.al.: Design and Metrological Characterization of a Digitizer for the Highest Precision Magnet Powering in the High Luminosity Large Hadron Collider

https://cds.cern.ch/record/2893058/files/Design_and_Metrological_Characterization_of_a_Digitizer_for_the_Highest_Precision_Magnet_Powering_in_the_High_Luminosity_Large_Hadron_Collider.pdf

HPM7177 digitizer, open hardware

<https://ohwr.org/project/opt-adc-10k-32b-1cha>

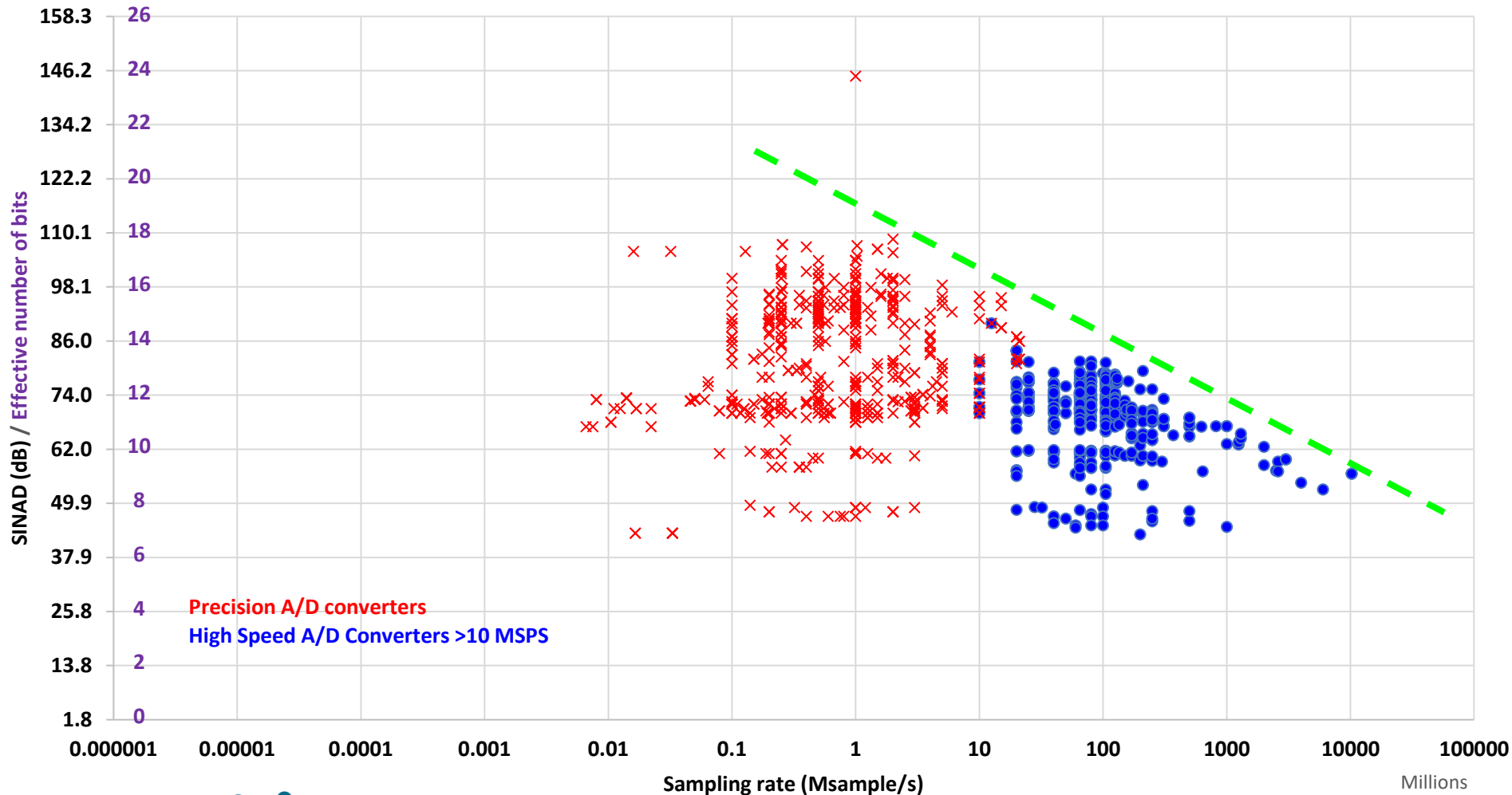
Valuch Daniel et.al.: New generation of very low noise beam position measurement system for the LHC transverse feedback

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2420/1/012073>



Reálne limity AD prevodu

1178 typov AD prevodníkov z portfólia Analog Devices, september 2022

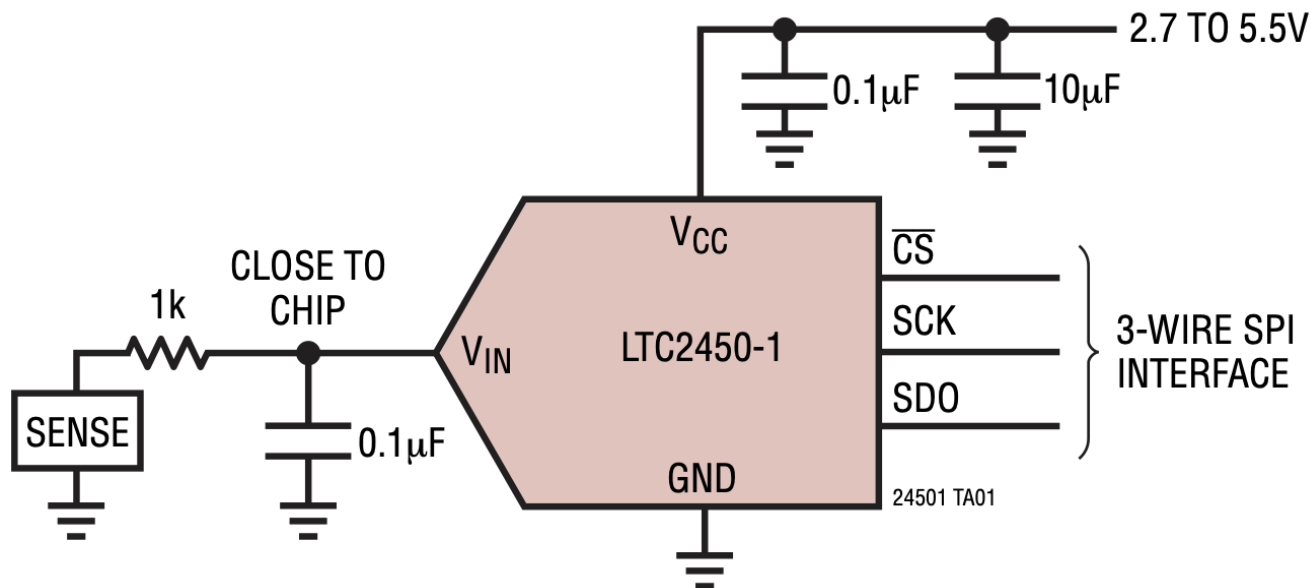


Pripojenie vstupného signálu k ADC

- Nevhodné, alebo nesprávne pripojenie analógového signálu ku vstupu ADC môže úplne znehodnotiť meranie
- Dva principiálne spôsoby pripojenia:
 - Single ended
 - Differential
 - (Pseudo-differential)

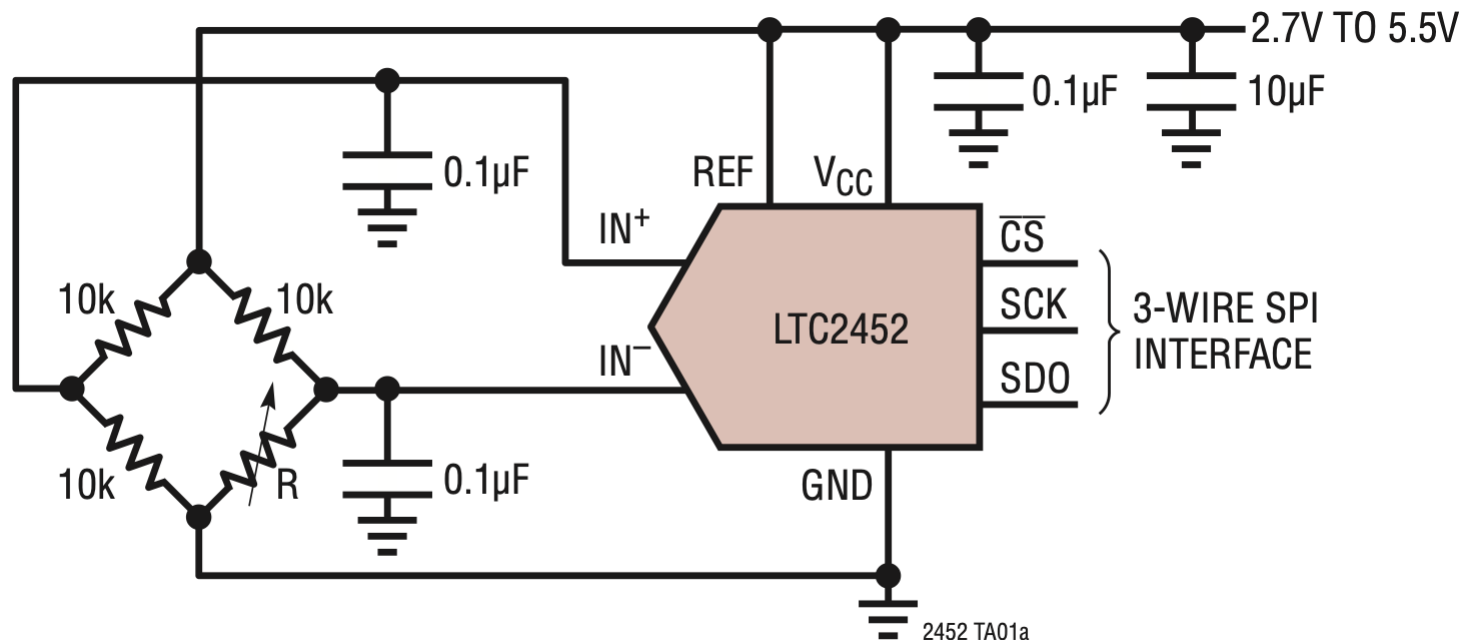
Pripojenie vstupného signálu k ADC

- Single-ended pripojenie: AD prevodník meria rozdiel napätia medzi vstupom a GND terminálom
- Jednoduché, citlivé na správne pripojenie signálov
- Meranie s nižšími nárokmi na presnosť a odolnosť voči rušeniu



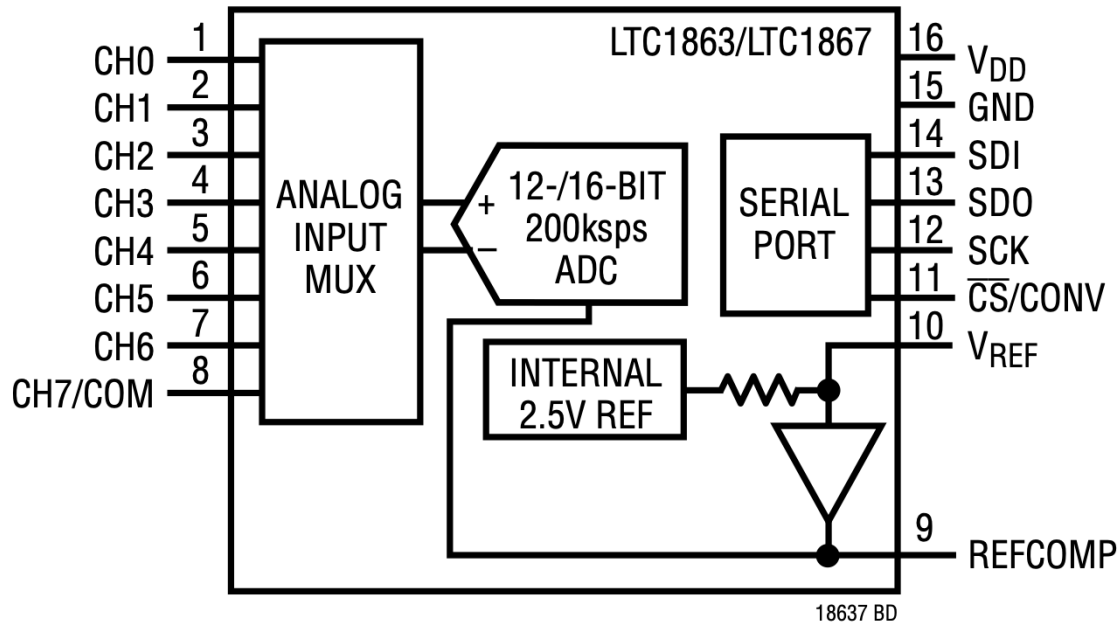
Pripojenie vstupného signálu k ADC

- Differential pripojenie: AD prevodník meria rozdiel napätia medzi IN+ a IN- vstupmi
- Zložitejšie, ale poskytuje množstvo výhod
- Presné merania, vysoká odolnosť voči rušeniu



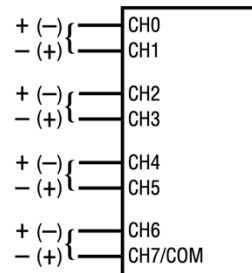
Pripojenie vstupného signálu k ADC

- ADC s prepínaním vstupov: jeden AD prevodník, ale rôzne možnosti pripojenia
- Naraz môže prebiehať meranie len jedného vstupu!

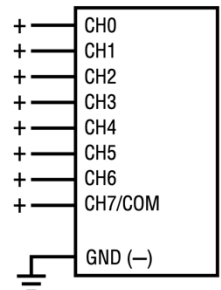


Examples of Multiplexer Options

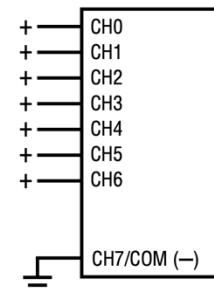
4 Differential



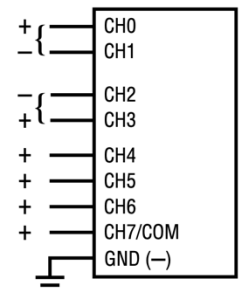
8 Single-Ended



7 Single-Ended to CH7/COM

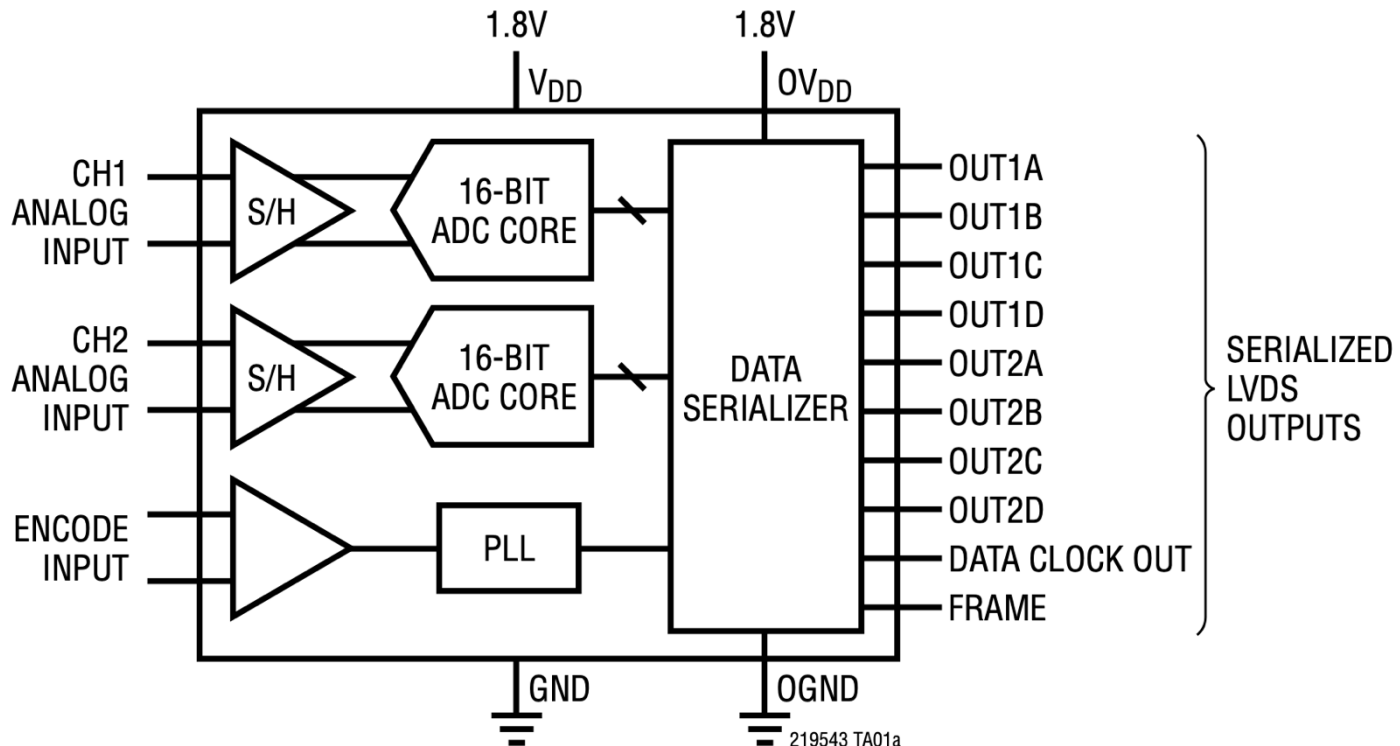


Combinations of Differential and Single-Ended



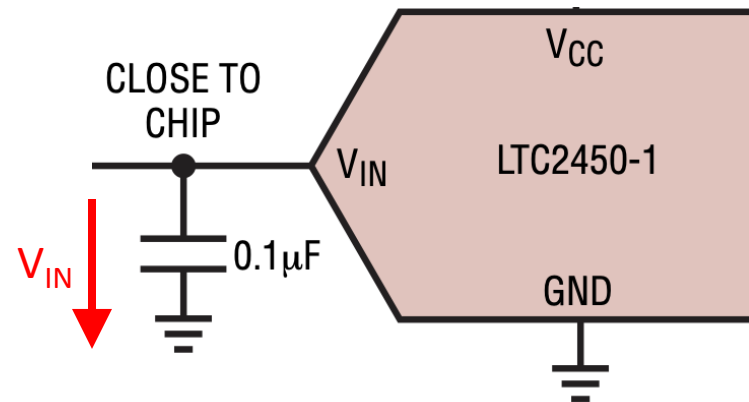
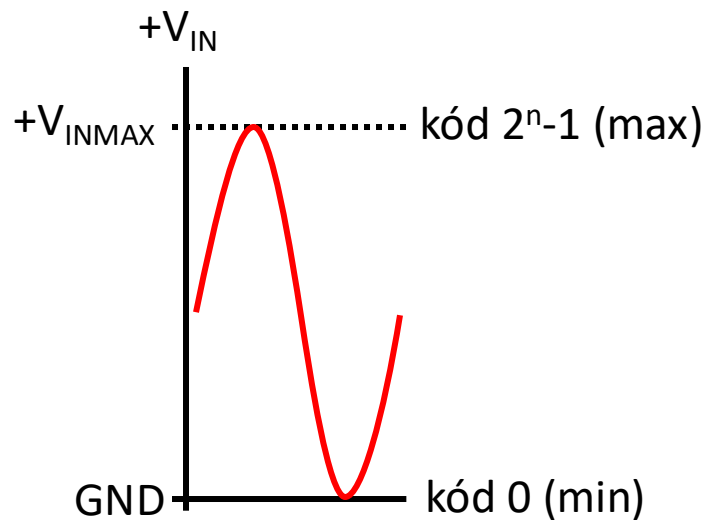
Pripojenie vstupného signálu k ADC

- Viackanálový ADC: viac AD prevodníkov na jednom čipe
- Konverzia každého vstupu prebieha súbežne (paralelne)



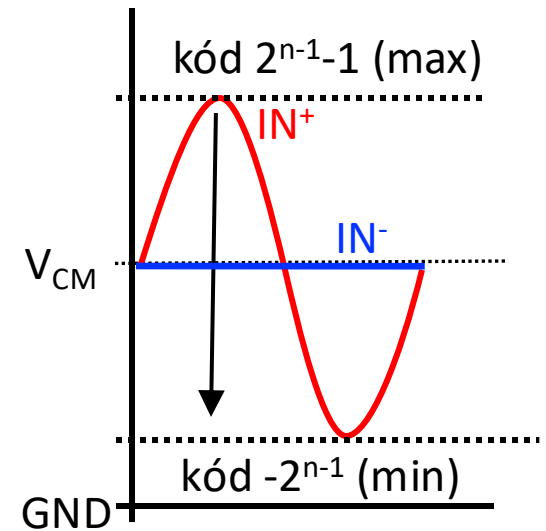
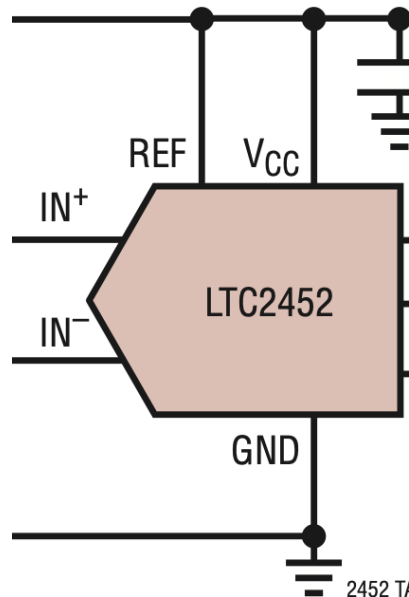
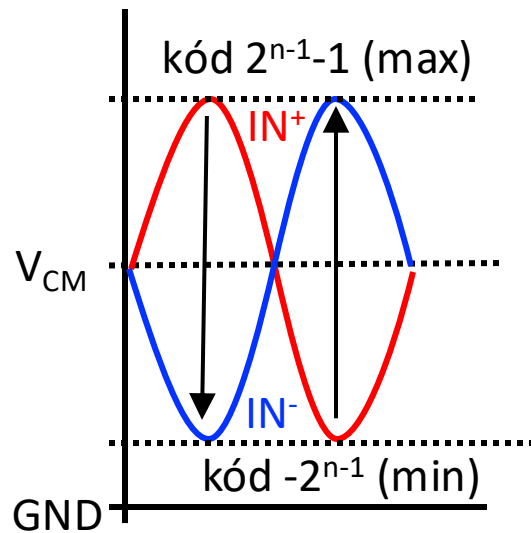
Pripojenie vstupného signálu k ADC

- Pre prevodníky so single-ended vstupmi je vstupný rozsah typicky unipolárny



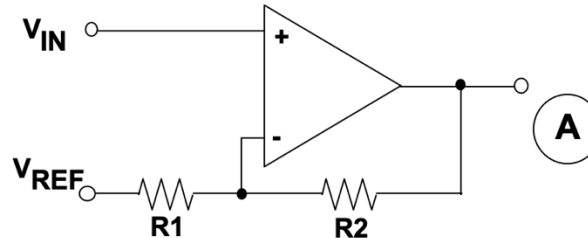
Pripojenie vstupného signálu k ADC

- Pre prevodníky s diferenciálnymi vstupmi je vstupný rozsah typicky bipolárny



Obvody pre zosilnenie signálu a posunuly

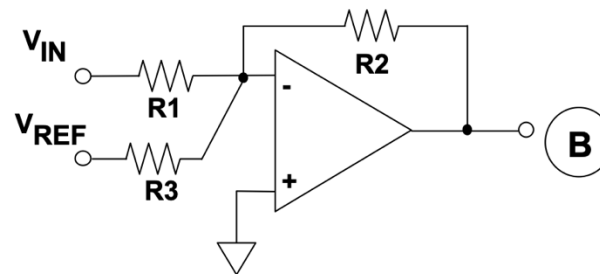
The circuit of Figure 6.10A operates in the non-inverting mode, and uses a low impedance reference voltage, V_{REF} , to offset the output.



$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in} - \frac{R_2}{R_1} V_{ref}$$

$$\text{NOISE GAIN} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

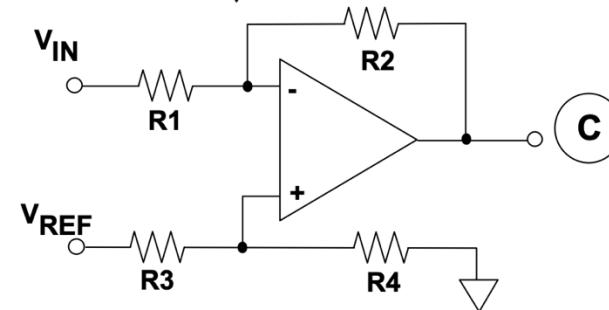
The circuit in Figure 6.10B operates in the inverting mode, and the signal gain is independent of the offset. The disadvantage of this circuit is that the addition of R_3 increases the noise gain, and hence the sensitivity to the op amp input offset voltage and noise.



$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} - \frac{R_2}{R_3} V_{ref}$$

$$\text{NOISE GAIN} = 1 + \frac{R_2}{R_1 \parallel R_3}$$

The circuit in Figure 6.10C also operates in the inverting mode, and the offset voltage V_{REF} is applied to the non-inverting input without noise gain penalty. This circuit is also attractive for single-supply applications ($V_{REF} > 0$).



$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} + \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{ref}$$

$$\text{NOISE GAIN} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

<https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Data-Conversion-Handbook/Chapter6.pdf>

Zdroje referenčného napätia

- Analógovo číslicový prevod vyjadrí hodnotu meranej veličiny **ako pomer k hodnote** použitej referencie
- Kvalita referencie priamo ovplyvňuje kvalitu merania



$$U_{\text{merané}} = \frac{N}{2^n} U_{\text{referencia}}$$

$$N = \text{round}\left(\frac{U_{\text{merané}}}{U_{\text{referencia}}} 2^n\right)$$

kde:

N – číslo z AD prevodníka

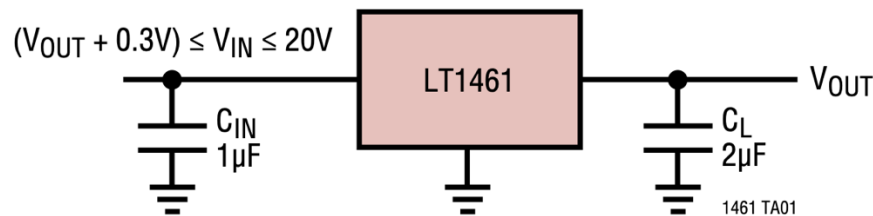
n – počet bitov AD prevodníka

Zdroje referenčného napätia

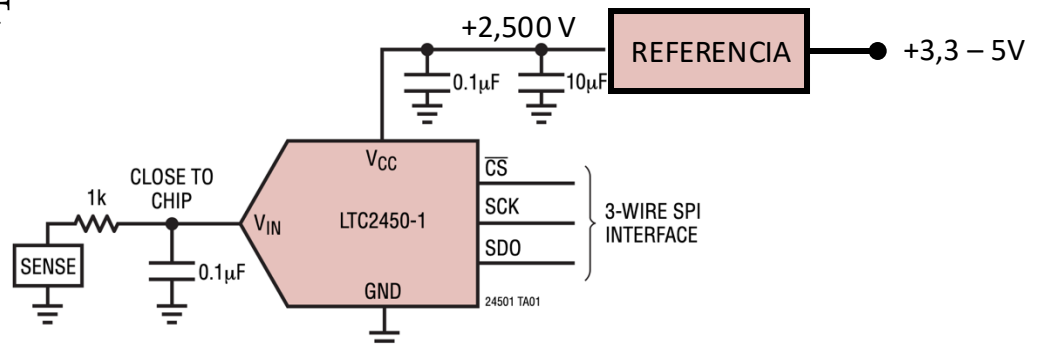
- Kvalita zdroja referenčného napätia U_{REF} priamo ovplyvňuje kvalitu merania.
- Príklad:
 - Absolútna hodnota referenčného napätia U_{REF} ($3,300\text{ V} \pm 0.02\%$)
 - Stabilita hodnoty U_{REF} s teplotou ($2\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$)
 - Stabilita hodnoty U_{REF} s časom ($50\text{ ppm after } 5000\text{ hours}$)
 - Stabilita hodnoty U_{REF} s napájacím napätím ($1\text{ ppm}/\text{V}$)
 - Stabilita hodnoty U_{REF} so záťažou ($10\text{ ppm}/\text{mA}$)
 - Šum ($2,1\text{ mV}_{p-p}$)

Zdroje referenčného napätia

- Typy referencií:
 - Sériové – Series – “stabilizátor napätia”
 - Sériové s nízkym úbytkom napätia – Low dropout series
- Obyčajne vyšší výstupný prúd (1 mA ... 10 mA)

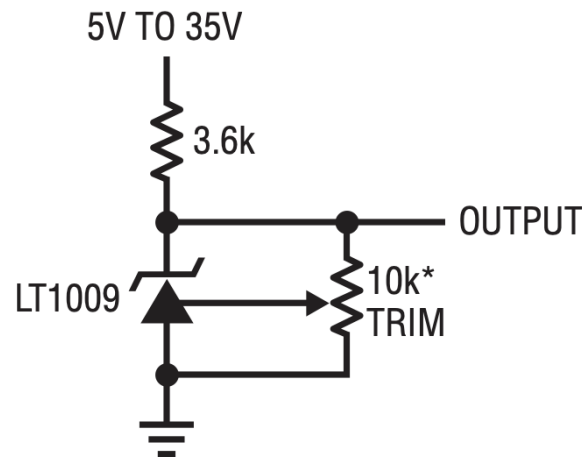


- Umožňujú priamo napájať niektoré AD prevodníky, ktoré používajú V_{CC} ako UREF



Zdroje referenčného napätia

- Typy referencií:
 - Paralelné – Shunt – “dióda”
- Typicky nízka prúdová zaťažiteľnosť, nutné použiť v spojení s presným OZ



* DOES NOT AFFECT
TEMPERATURE COEFFICIENT.
±5% TRIM RANGE

Zdroje referenčného napätia

- Hodnoty napätí 1,25 - 1,8 - 2,048 - 2,5 - 3,3 - 4,096 - 5 - 10 V
- Initial accuracy 0,02% ... 5%
- Tempco 0,05 ... 170 ppm/°C
- Cena 0.28\$... 200\$
- V súčasnosti najstabilnejšia komerčne dostupná referencia je “oven compensated buried zener reference” LTZ100A (resp. nástupca ADR1000), so stabilitou 0,05 ppm/°C a 0,2 ppm/rok.
- Používa sa vo všetkých meracích prístrojoch metrologickej kvality. Lepšie sú už len kvantové supravodivé etalóny (Josephson junction), ktoré realizujú priamo definíciu SI jednotky Volt.

Komunikačné zbernice ADC

- Navzorkované dáta z prevodníka je nutné preniesť “spotrebiteľovi”
 - Mikrokontrolér, programovateľné logické pole...
- Prenos dát
 - Jeden dátový bod typ. 8...32 bitov
 - Príležitostný prenos
 - ... 10^9 prenosov za sekundu
- Výber kanála pred meraním u viackanálového prevodníka
- Stovky parametrov a nastavení v konfiguračnej pamäti u zložitých AD prevodníkov

Komunikačné zbernice ADC

- Malé a pomalé prevodníky ($< \text{kSps}$): I2C
- Stredne rýchle prevodníky ($< 4 \text{ MSps}$): Sériová SPI zbernica
- Rýchle prevodníky (100 Msps): Paralelná CMOS, LVDS zbernica
- Rýchle prevodníky (100-vky Msps): Paralelná DDR zbernica
- Rýchle prevodníky (100-vky Msps): Sériová LVDS zbernica
- Ultra rýchle prevodníky (Gsps): Sériová JESD204 zbernica (multiple lanes, 12.5 Gbps)

Spracovanie signálov z prevodníka

- Oprava statických chýb prevodníka – kompenzácia chyby nuly a chyby zosilnenia
- Jednoduché operácie – stredná hodnota, RMS hodnota
- Filtrovanie
- Zložitejšie operácie (sin, cos, log, sqrt)

Dátové typy

- **Integer** celé číslo
 - byte 8 bitov, rozsah -128...+127, 0...255
 - word, short 16 bitov, rozsah -32768...+32767, 0...65535
 - doubleword, long 32 bitov, rozsah -2 147 483 648 to 2 147 483 647, 0...4 294 967 295
 - quadword, longlong 64 bitov, rozsah $-2^{63} \dots +2^{63}-1$, $0 \dots +2^{64}-1$

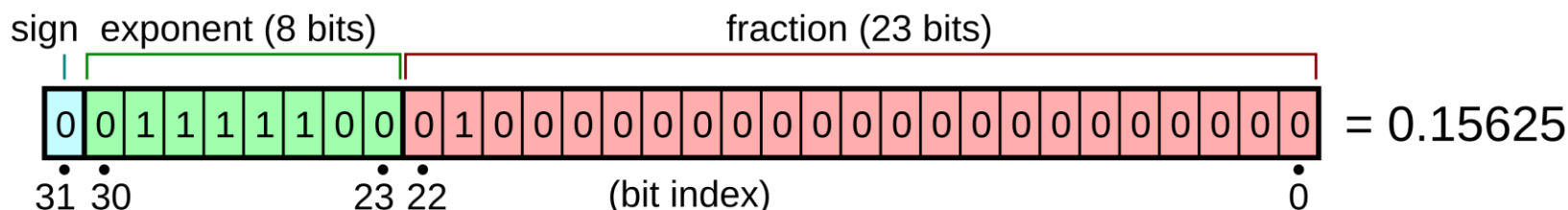
Typ	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Signed	Znamienko	6	5	4	3	2	1	0
Unsigned	7	6	5	4	3	2	1	0

- Obmedzený dynamický rozsah
- Matematické operácie **zachovávajú presnosť**

Dátové typy

- **Float** pohyblivá rádová čiarka

- Single precision, 32 bitov, $\sim 7,2$ desiatkových číslíc, rozsah $\pm 3.40 \times 10^{38}$
- Double precision, 64 bitov, $\sim 15,9$ desiatkových číslíc, rozsah $\pm 1.8 \times 10^{308}$



- Obrovský dynamický rozsah (38 / 308 rádov)
- Ale obmedzená presnosť (7,2 / 15,9 desiatkových číslíc)
- Matematické operácie **nezachovávajú presnosť**

Jednoduché operácie

- Súčet dvoch n-bitových čísiel v integer

$$A \text{ (8 bitov)} + B \text{ (8 bitov)} = C \text{ (8+1 bitov)}$$

- **Pribudne jeden bit** – carry, prenos do vyššieho rádu
- Zachováva presnosť
- Koľko bitov pribudne ak budeme sčítať 1024 rovnakých vzoriek?

Jednoduché operácie

- Násobenie dvoch n-bitových čísiel v integer

unsigned A (8 bitov) x B (8 bitov) = C (16 bitov)

signed A (7+1 bitov) x B (7+1 bitov) = C (14+2 bitov)

- Výsledok má dvojnásobný počet bitov

- Zachováva presnosť

Jednoduché operácie

- Súčet dvoch čísiel vo float

$$A \text{ (32-bitov)} + B \text{ (32 bitov)} = C \text{ (32 bitov)}$$

- Násobenie dvoch čísiel vo float

$$A \text{ (32-bitov)} \times B \text{ (32 bitov)} = C \text{ (32 bitov)}$$

- Výsledok má rovnaký počet bitov
- Stráca sa presnosť, ale získame flexibilitu, výsledok môže byť vo veľkom rozsahu rádov
- Umožňuje koncept nekonečna a NaN (napr. delenie nulou)

Jednoduchý priemer

- Vstupné dáta z prevodníka $x[1], x[2], \dots x[n]$
- Výpočet z N bodov
- V akumulátore sa zbiera suma a raz za N períód sa vypočíta priemer
- + Nepotrebuje pamäť
- Výsledok len raz za N períód
- Pozor pri implementácii vo float!

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} (x[1] + x[2] + \dots + x[N]) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x[i]$$

Kĺzajúci priemer

- Vstupné dáta z prevodníka $x[1], x[2], \dots x[n]$
- Výpočet z N bodov
- V FIFO registri sa ukladá N vzoriek. Priemer sa počíta každú vzorku, zo všetkých vzoriek
- + Výsledok každú vzorku
- Potrebuje pamäť, výpočtovo náročnejšie
- Pozor pri implementácii vo float!

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} (x[k + 0] + x[k + 1] + \dots + x[k + N]) = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N} x[i]$$

Exponenciálne tlmený priemer

- Rekurzívny algoritmus (IIR), váha historických vzoriek sa exponenciálne znižuje
- Použitie najmä na vyhladzovanie, nie presné výpočty
- + Výsledok každú vzorku
- + Nepotrebuje pamäť
- Nie je to presný priemer

$$s[0] = x[0]$$

$$s[n] = \alpha x[n] + (1 - \alpha) s[n - 1] \quad 0 < \alpha < 1$$

$$\tau = -\frac{\Delta T}{\ln(1 - \alpha)}$$

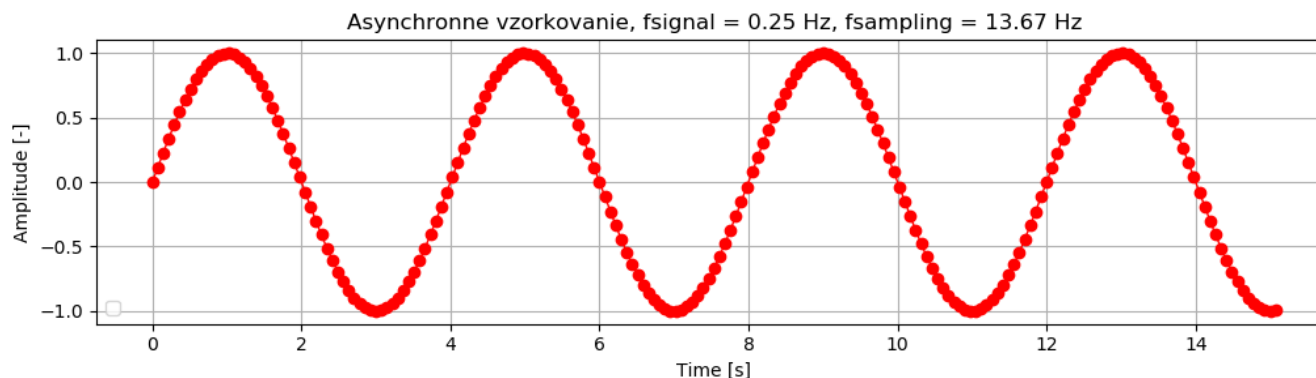
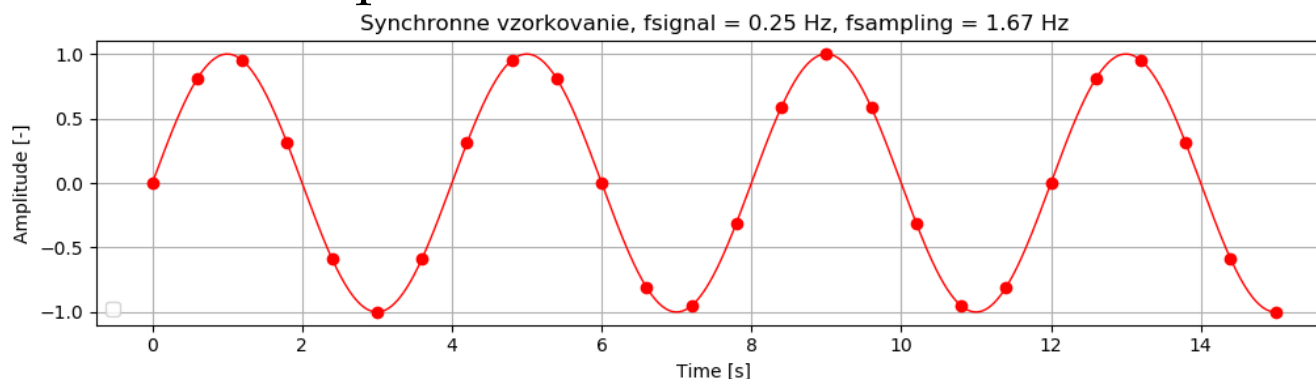
Efektívna hodnota

- Analógový výpočet veľmi komplikovaný. Číslicová metóda je výrazne presnejšia
- Nie je potrebná pamäť

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} (x[1]^2 + x[2]^2 + \dots + x[N]^2)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x[i]^2}$$

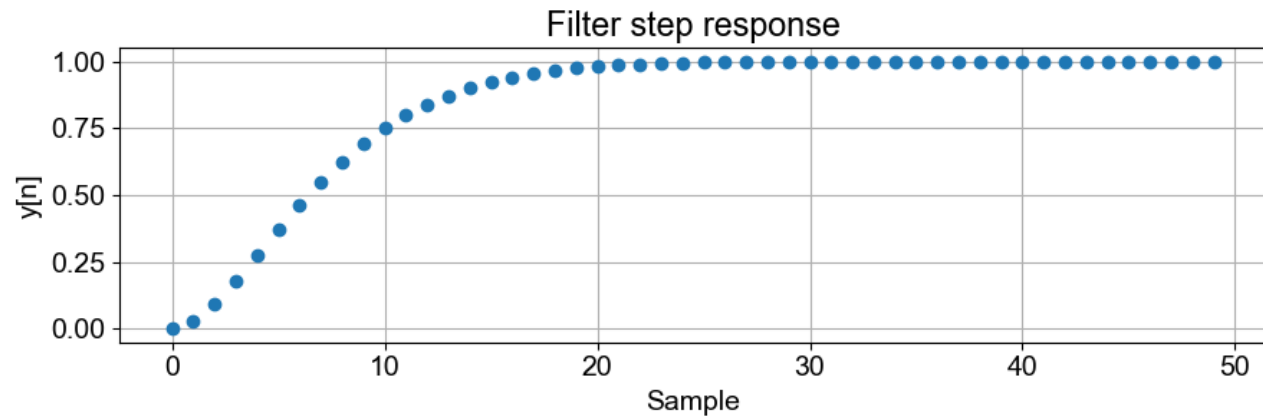
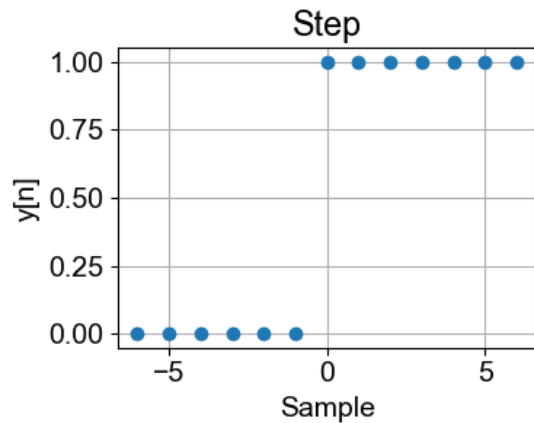
Efektívna hodnota

- Pre správny výpočet je nutný celočíselný počet vzoriek na periódu signálu. Problém sa dá čiastočne vyriešiť vysokým počtom vzoriek na periódu

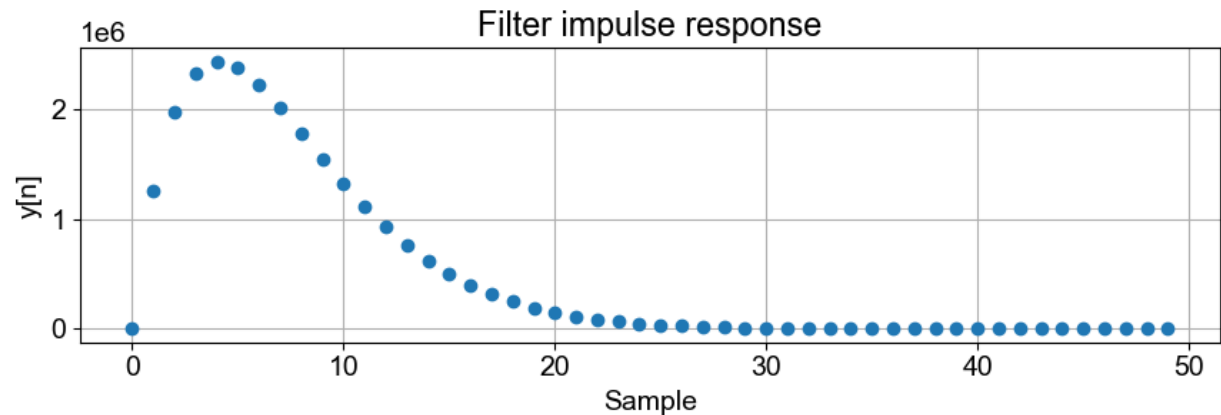
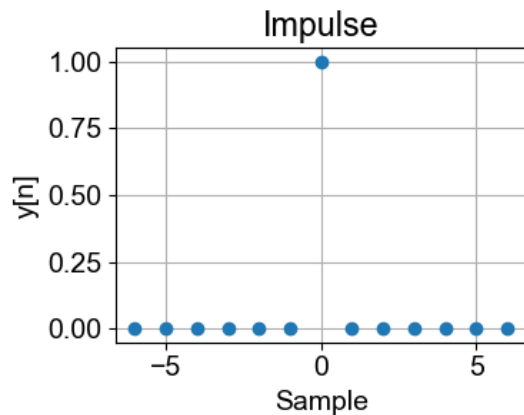


Ako sa číslicovo filtruje?

- Skoková odozva filtra



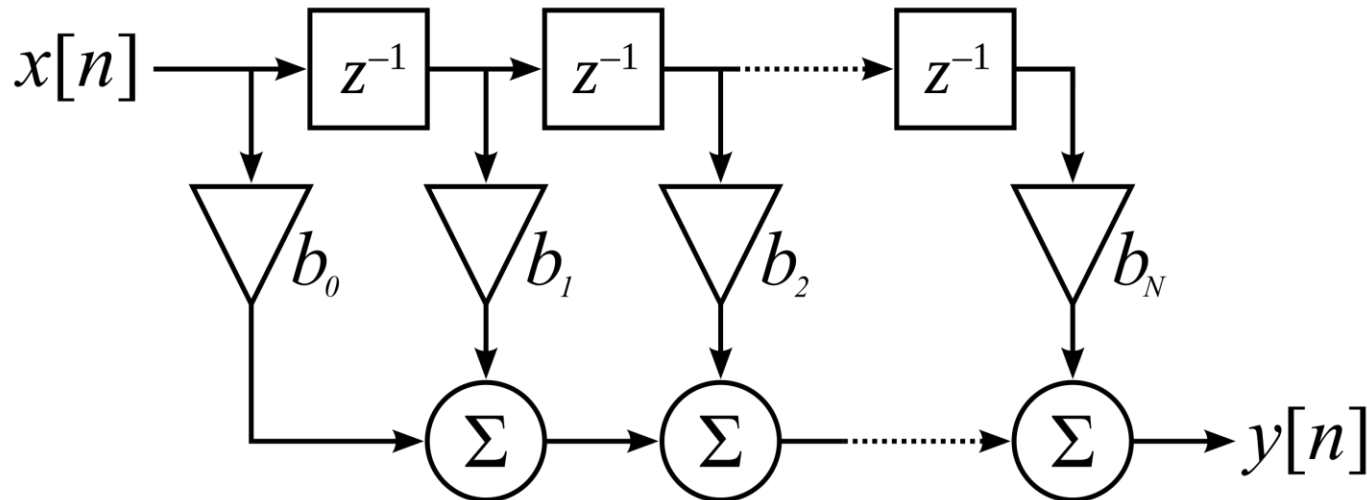
- Impulzná odozva filtra



Ako sa číslicovo filtruje?

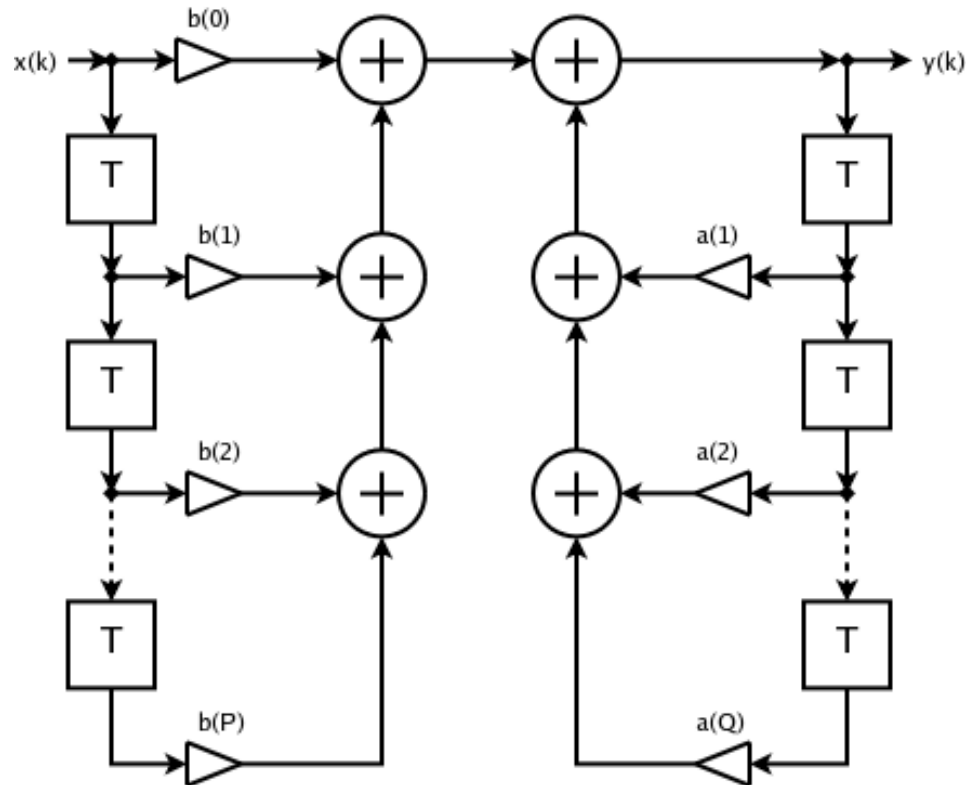
- Filter s konečnou impulznou odozvou (**F**inite **I**mpulse **R**esponse)
- Ľahko sa implementuje, z princípu stabilný, málo citlivý na numerické chyby
- Vhodný pre nenáročné aplikácie (nízka strmosť)

$$y[n] = x[n]b_0 + x[n-1]b_1 + x[n-2]b_2 + \dots + x[n-N]b_N$$



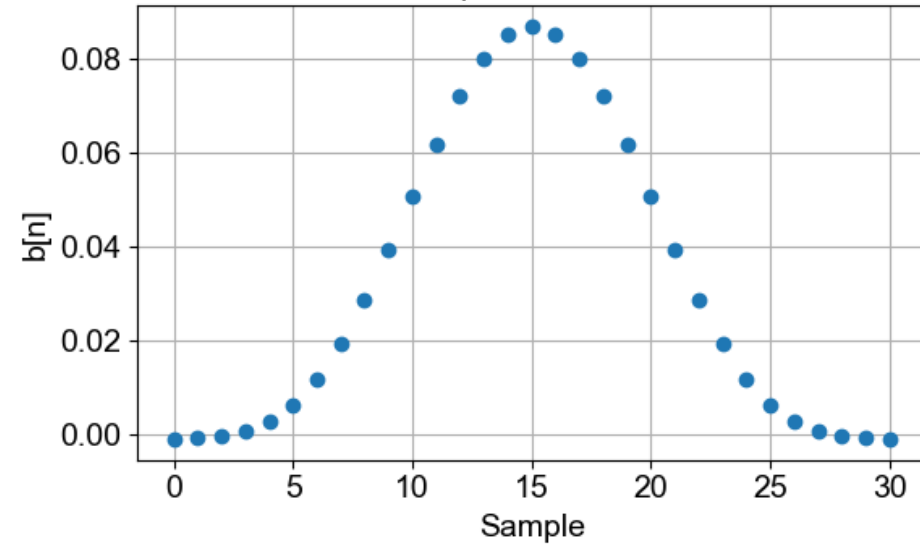
Ako sa číslicovo filtruje?

- Filter s nekonečnou impulznou odozvou (**I**nfinite **I**mpulse **R**esponse)
- Ťažko sa implementuje v integer aritmetike
- Z princípu nestabilný, veľmi citlivý na numerické chyby a inicializáciu
- Dokáže zrealizovať ľubovoľný polynóm (funkciu)

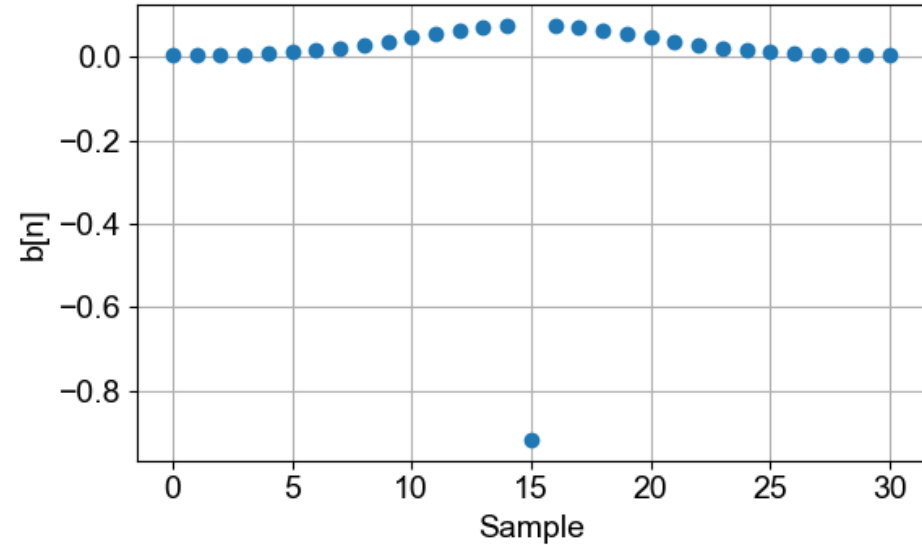


Filtrovane, príklad FIR filtrov

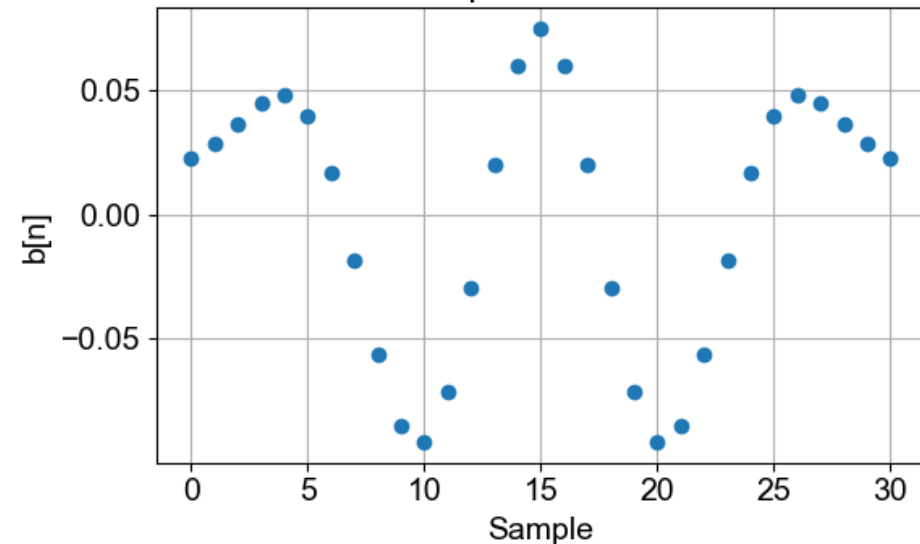
Low pass FIR filter



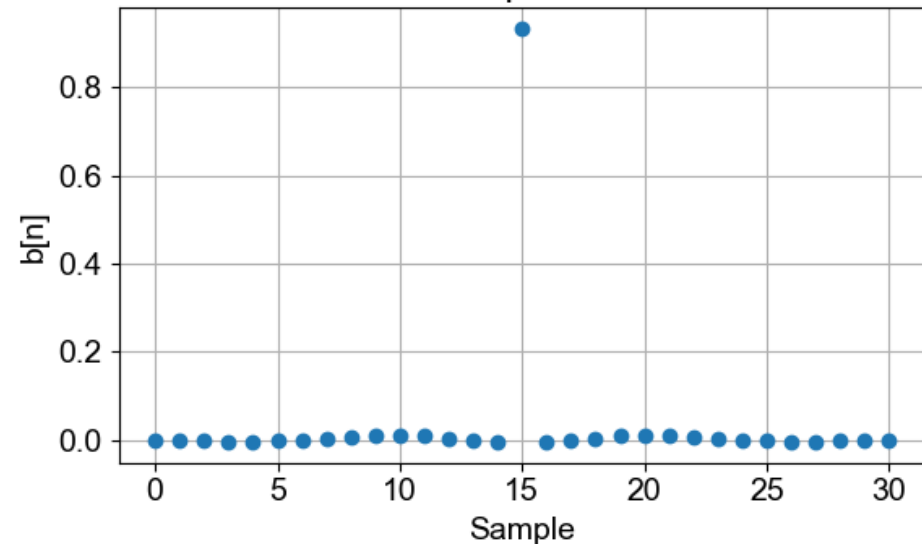
Highpass FIR filter



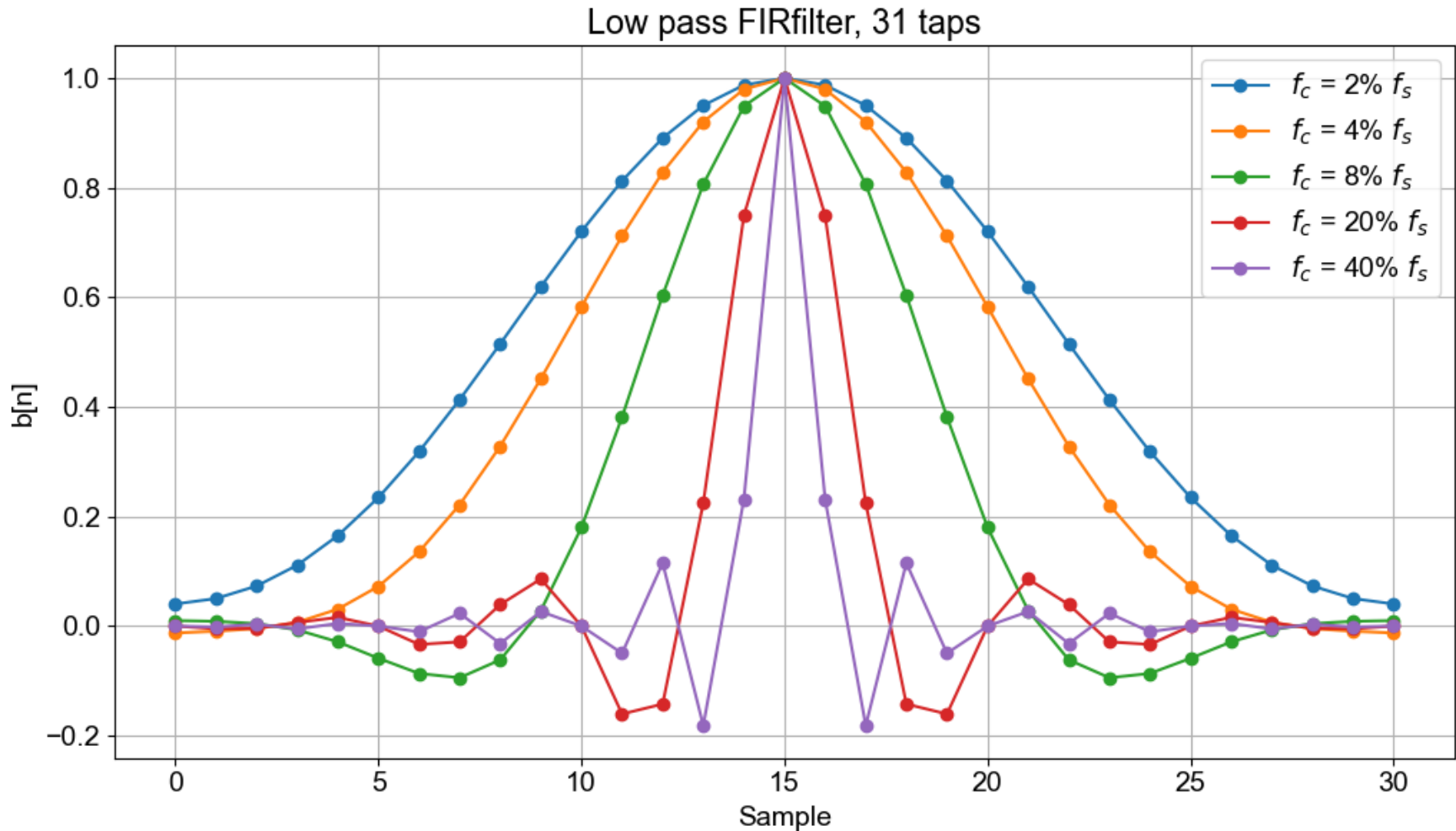
Bandpass FIR filter



Bandstop FIR filter



Filtrovanie, príklad dolná priepusť



Zložitejšie operácie (sin, cos, log, sqrt)

- Procesory, mikrokontroléry, FPGA natívne podporujú sčítanie, odčítanie, násobenie, delenie. V pevnej aj pohyblivej rádovej čiarke
- Zložitejšie operácie ako sin, cos, log, sqrt je nutné implementovať len pomocou základných operácií
- Obyčajne iteračné algoritmy typu CORDIC, vyhľadávacie tabuľky a pod.
- Výpočet trvá výrazne dlhšie ako $+ - * /$



Ďakujem za pozornosť