

Сензорни схеми и устройства

Съдържание

1. Увод. Елементарни, интегрални и интелигентни сензори
2. Основни сензорни характеристики
3. Схеми за нормиране на сензорните сигнали
4. Методи за аналогово-цифрово преобразуване в сензорните системи

4.1. Увод

- **Критерии за избор на АЦП**
 - **Основни:**
 - Изисквана точност на системата
 - Изисквана разделителна способност
 - Особености на аналоговите сигнали
 - Скорост на преобразуване
 - Условия на околната среда
 - Необходимост от S&H- и S&T-схеми
 - **Допълнителни:**
 - Брой на измервателните канали
 - Външен или вътрешен опорен източник
 - Необходимост от предусилватели
 - Изисквания на цифровия интерфейс
 - Изискван вид на изходния сигнал

4.1. Увод

Таблица 5.1. Основни методи за АЦП

Метод	r	h	Особености
Паралелен	1	2^n-1	Голямо бързодействие, сложна реализация, висока цена
Последователен	n	n	Добро бързодействие, несложна реализация, необходимост от S & H-схеми
Броителен	2^n-1	1	Ниско бързодействие, проста реализация, ниска цена, висока разделителна способност и точност, няма необходимост от S & H-схеми, много добро подтискане на шумовете

n – битове (разделителна способност)

r – брой стъпки

h – брой опорни напрежения

4.1. Увод

- **АЦП в интегралните и интелигентните сензори**

- **Особености при АЦП с ниско захранване и консумация**
 - Типични захранващи напрежения $\pm 5\text{ V}$, $+5\text{ V}$, $+5/+3\text{ V}$ или $+3\text{ V}$.
 - По-малкият обхват на входните сигнали повишава чувствителността към всички източници на шум (захранване, опорни напрежения, цифрови сигнали).
 - Широчината на честотната лента пада при понижаване на захранването.
 - Обхватът на синфазните сигнали се стеснява.
 - Изборът на входен буфериращ усилвател е затруднен.
 - Необходимост от процедури за самокалибриране за постигане на висока разделителна способност и пълноценно използване на динамичния обхват на АЦП.

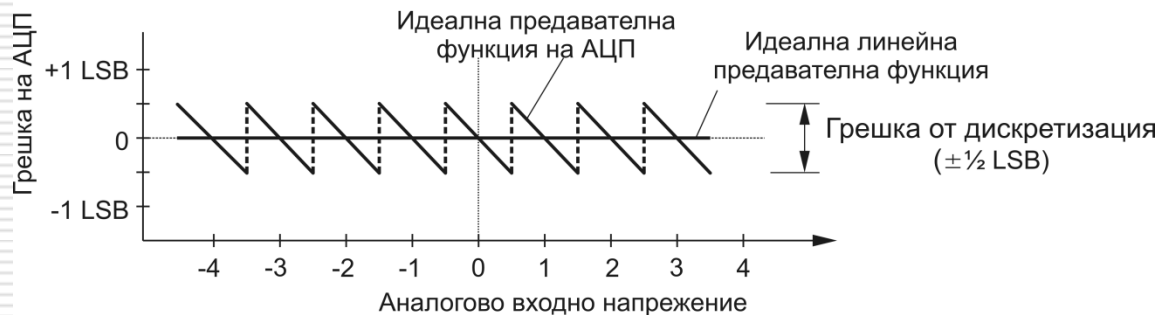
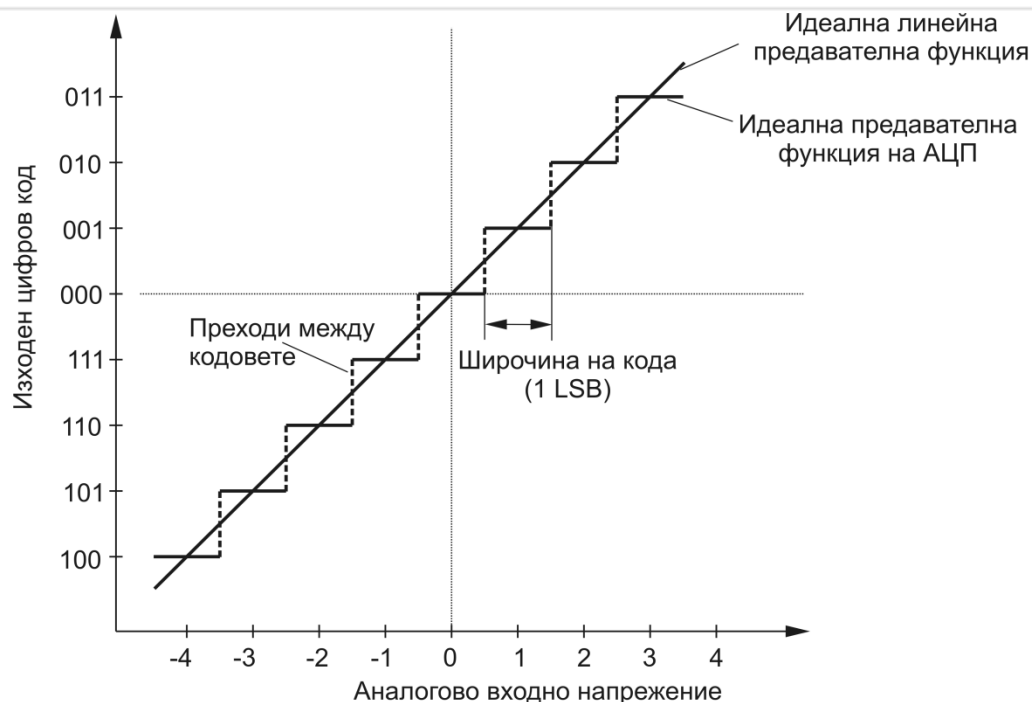
4.1. Увод

□ Основни
характеристики

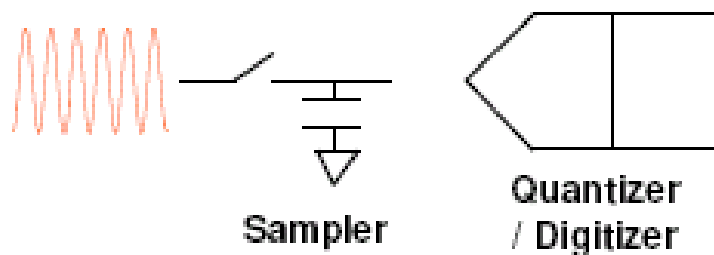
□ SNR

□ ENOB

□



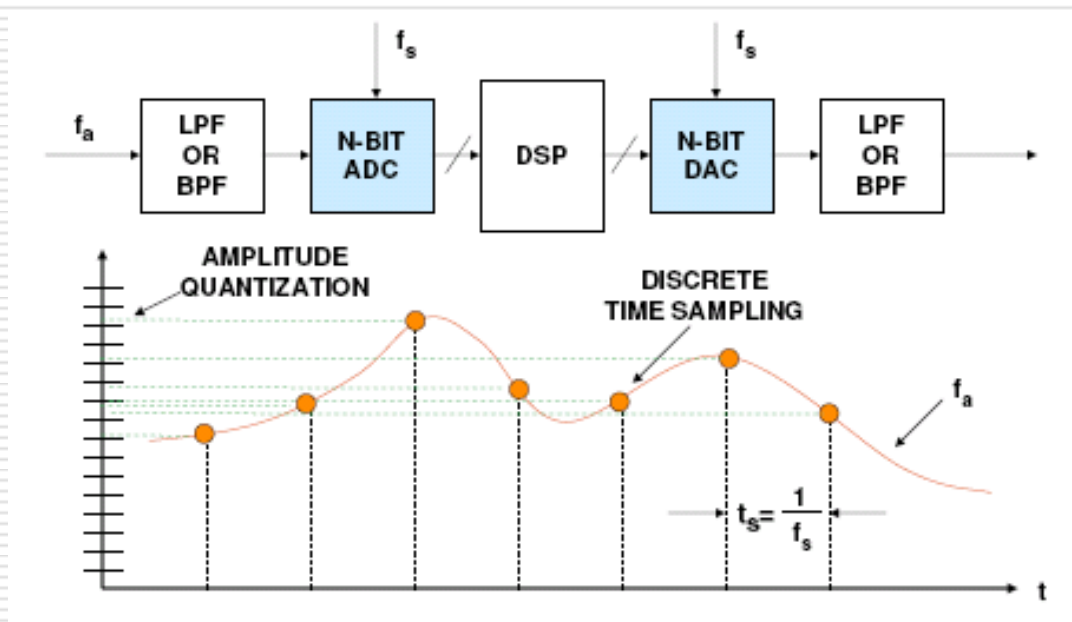
4.1. Увод



- **Дискретизация по време** – преход от непрекъснат към дискретен времеви сигнал
 - следене & запомняне, върхови детектори, филтри с превключваеми кондензатори
- **Дискретизация по ниво** – преход от непрекъснат сигнал към сигнал с дискретни стойности.
 - Компаратори
- **Кодиране** – дискретните нива на сигнала се кодират
 - Децимиращи филтри, регистри (SAR)

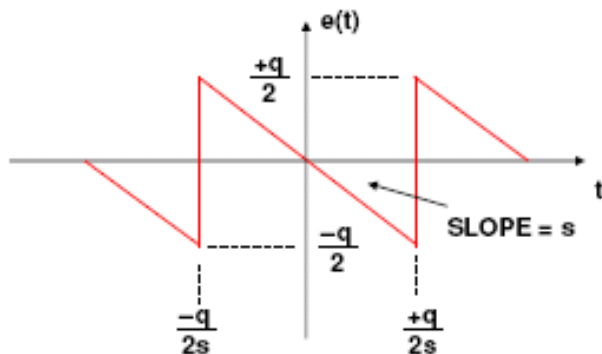
4.1. Увод

□ Дискретизация по време и ниво



4.1. Увод

□ Шум от дискретизация като функция на времето



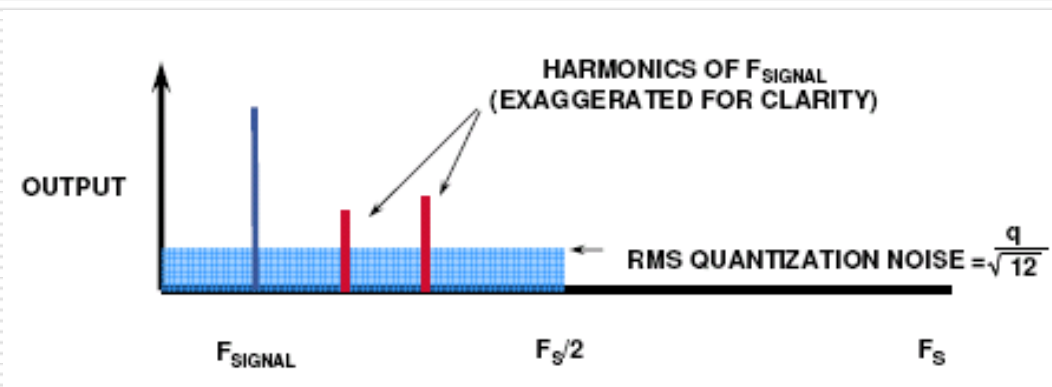
◆ ERROR = $e(t) = st$, $-\frac{q}{2s} < t < \frac{q}{2s}$

◆ MEAN-SQUARE ERROR = $\overline{e^2(t)} = \frac{s}{q} \int_{-q/2s}^{+q/2s} (st)^2 dt = \frac{q^2}{12}$

◆ ROOT-MEAN-SQUARE ERROR = $\sqrt{\overline{e^2(t)}} = \frac{q}{\sqrt{12}}$

4.1. Увод

- Шум от дискретизация като функция на времето
 - Ако шумът от дискретизация **не корелира** с променливия входен сигнал,
 - То той ще бъде разпределен равномерно в честотната лента на на Nyquist $F_s/2$. (приблизително бял шум)
 - Това поставя **ограничение за динамичния обхват** на системата.



4.1. Увод

- Теоретично отношение на сигнал към шум от дискретизация на идеален n-битов АЦП

- ◆ FS INPUT = $v(t) = \left[\frac{q 2^N}{2} \right] \sin(2\pi f t)$

- ◆ RMS Value of FS Sinewave = $\frac{q 2^N}{2\sqrt{2}}$

- ◆ RMS Value of Quantization Noise = $\frac{q}{\sqrt{12}}$

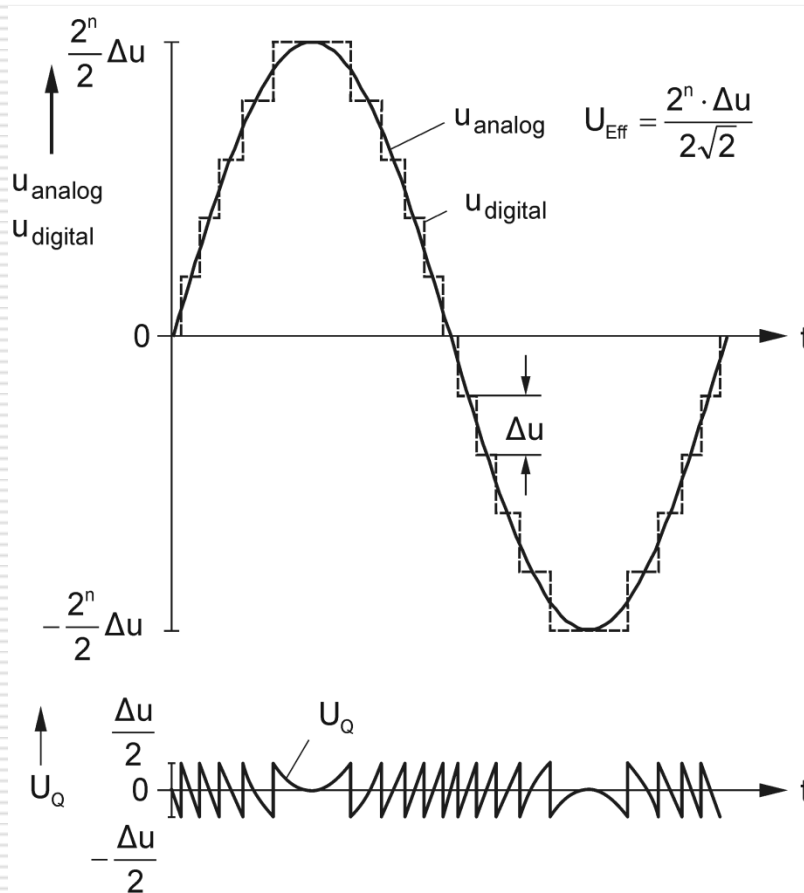
- ◆ $SNR = 20 \log_{10} \left[\frac{\text{RMS Value of FS Sinewave}}{\text{RMS Value of Quantization Noise}} \right] = 20 \log_{10} 2^N + 20 \log_{10} \sqrt{\frac{3}{2}}$

$$SNR = 6.02N + 1.76\text{dB}$$

(Measured over the Nyquist Bandwidth : DC to $f_s/2$)

4.1. Увод

□ Грешка от дискретизация U_Q



$$U_{IN} = \hat{U}_{IN} \sin \omega t$$

$$2\hat{U}_{IN} = U_{IN_{max}} = FSR$$

$$q = \frac{FSR}{2^n} = \frac{\hat{U}_{IN}}{2^{n-1}}$$

$$U_{Q_{Eff}} = \frac{q}{\sqrt{12}} = \frac{\hat{U}_{IN}}{\sqrt{12} \cdot 2^{n-1}}$$

4.1. Увод

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= 10 \lg \frac{P_s}{P_Q} = 20 \lg \frac{U_{\text{eff } S}}{U_{\text{eff } Q}} = \frac{\frac{\hat{U}_{\text{IN}}}{\sqrt{2}}}{\frac{\hat{U}_{\text{IN}}}{2^{n-1} \sqrt{12}}} = 20 \lg 2^{n-1} \frac{\sqrt{12}}{\sqrt{2}} = \\ &= 20 \lg 2^n \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} = 20n \cdot \lg 2 + 20 \cdot \lg \sqrt{1,5} \end{aligned}$$

$$\text{SNR} = 6,02n + 1,76$$

■ За синусоидални сигнали

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{SNR}_{\text{ИЗМЕРЕНО}} - 1,76}{6,02}$$

4.1. Увод

■ За постоянни сигнали

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= 10 \lg \frac{P_S}{P_Q} = 20 \lg \frac{U_{\text{eff } S}}{U_{\text{eff } Q}} = \frac{2\hat{U}_{\text{IN}}}{\frac{\hat{U}_{\text{IN}}}{2^{n-1}\sqrt{12}}} = \\ &= 20 \lg 2^n \sqrt{12} = 20n \cdot \lg 2 + 20 \lg \sqrt{12} \end{aligned}$$

$$\text{SNR} = 6,02n + 10,79$$

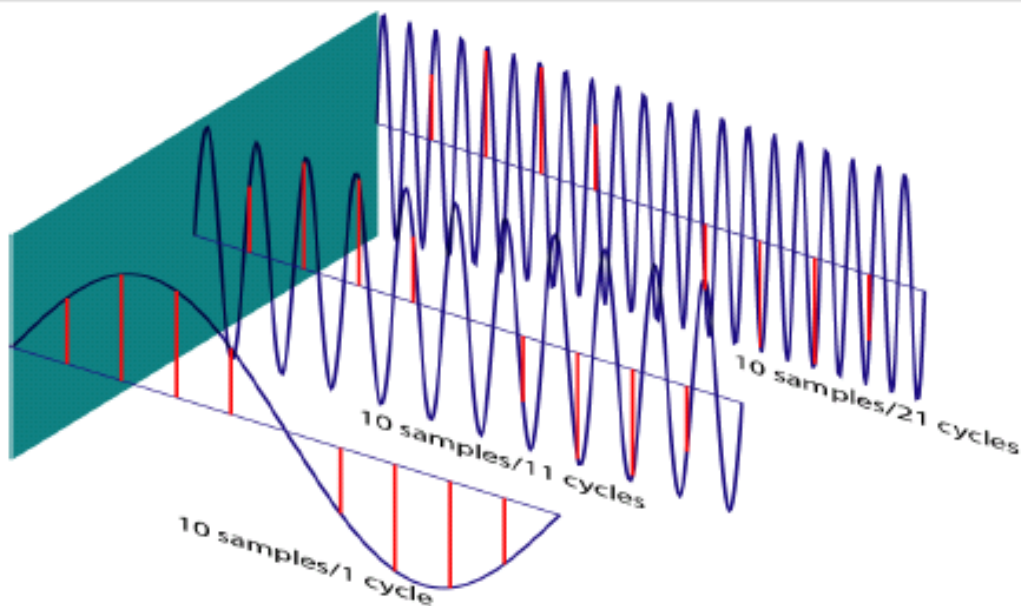
4.1. Увод

□ Ефективен брой битове n_{Eff} (ENOB)

$$n_{\text{Eff}} = \frac{\text{SNR}_{\text{ИЗМ}} - 1,76}{6,02}$$

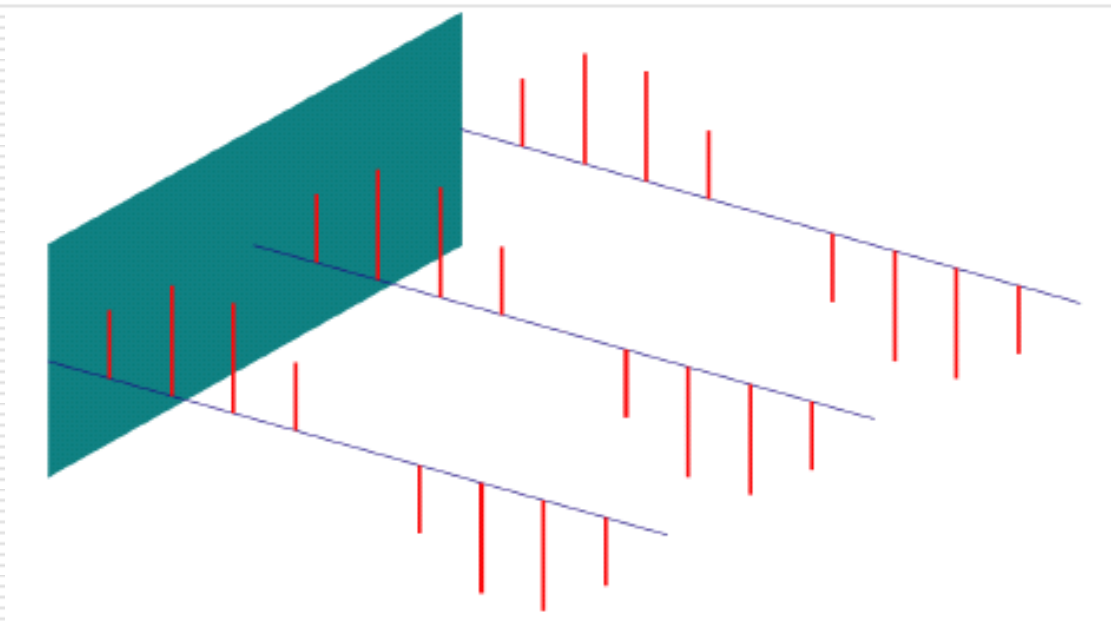
4.1. Увод

- Дискретизация на сигнали
 - 3 различни честоти, еднакъв резултат от дискретизация



4.1. Увод

- След дискретизацията информацията е загубена



4.1. Увод

- Критерии на Nyquist
 - Сигнал с максимална честота f_a трябва да бъде дискретизиран с честота $f_s > 2f_a$, в противен случай информацията за сигнала ще бъде загубена поради aliasing.
 - Aliasing се получава за $f_s < 2f_a$
 - Сигнал с честотни компоненти между f_a и f_b трябва да се дискретизира с честота $f_s > 2(f_b - f_a)$ за да се избегне поява на alias компоненти

4.1. Увод

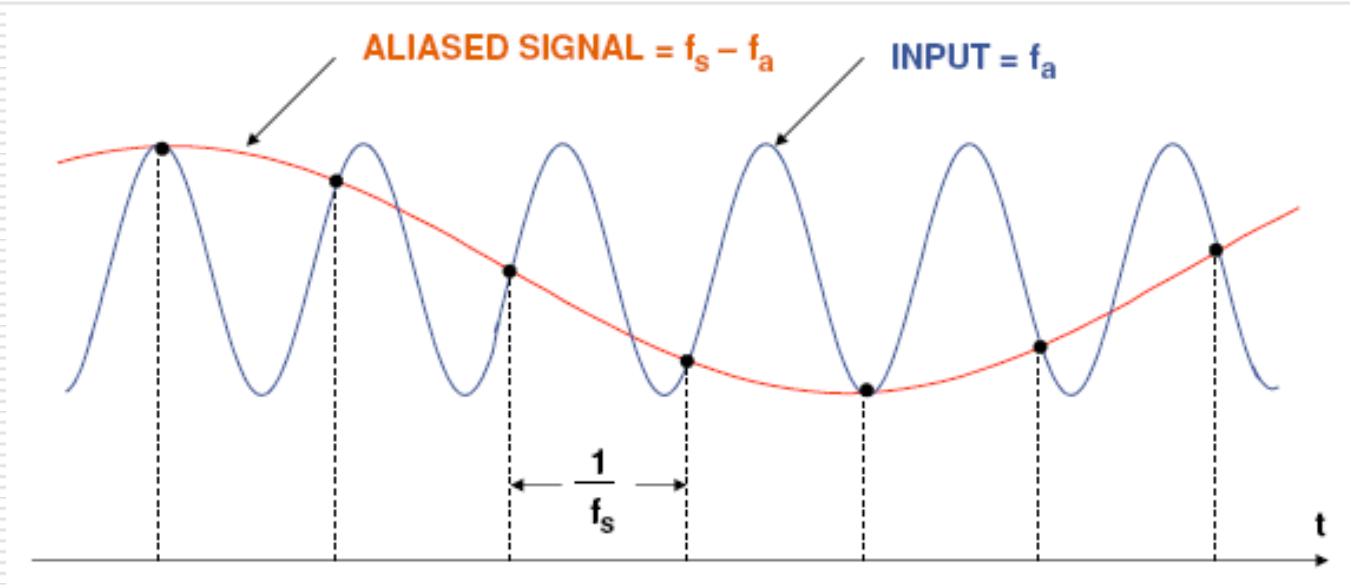
- Проява в различни области: пространствена, времева и др.



4.1. Увод

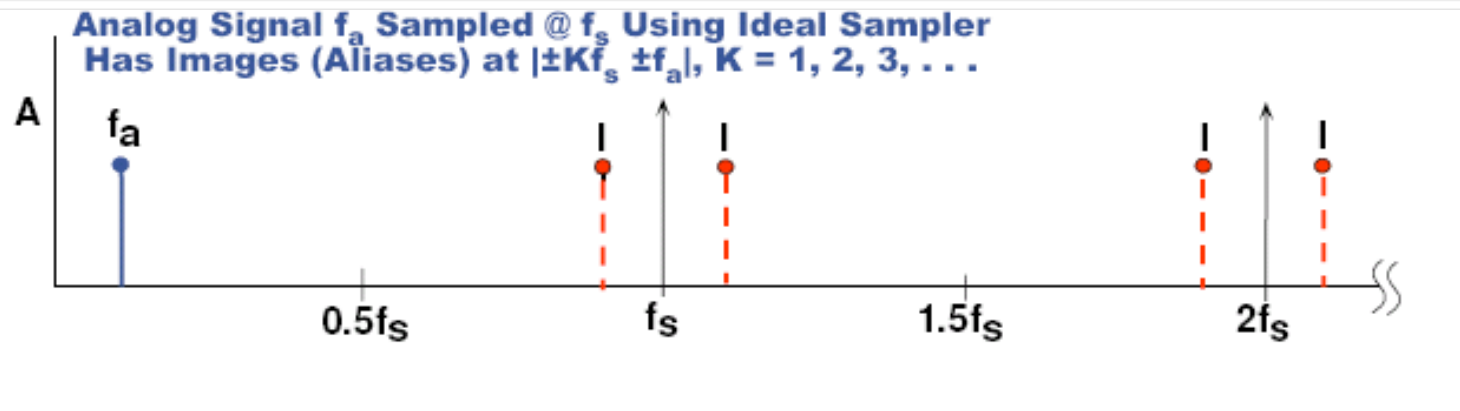
- Aliasing във времевата област

f_a е малко по-ниска от f_s



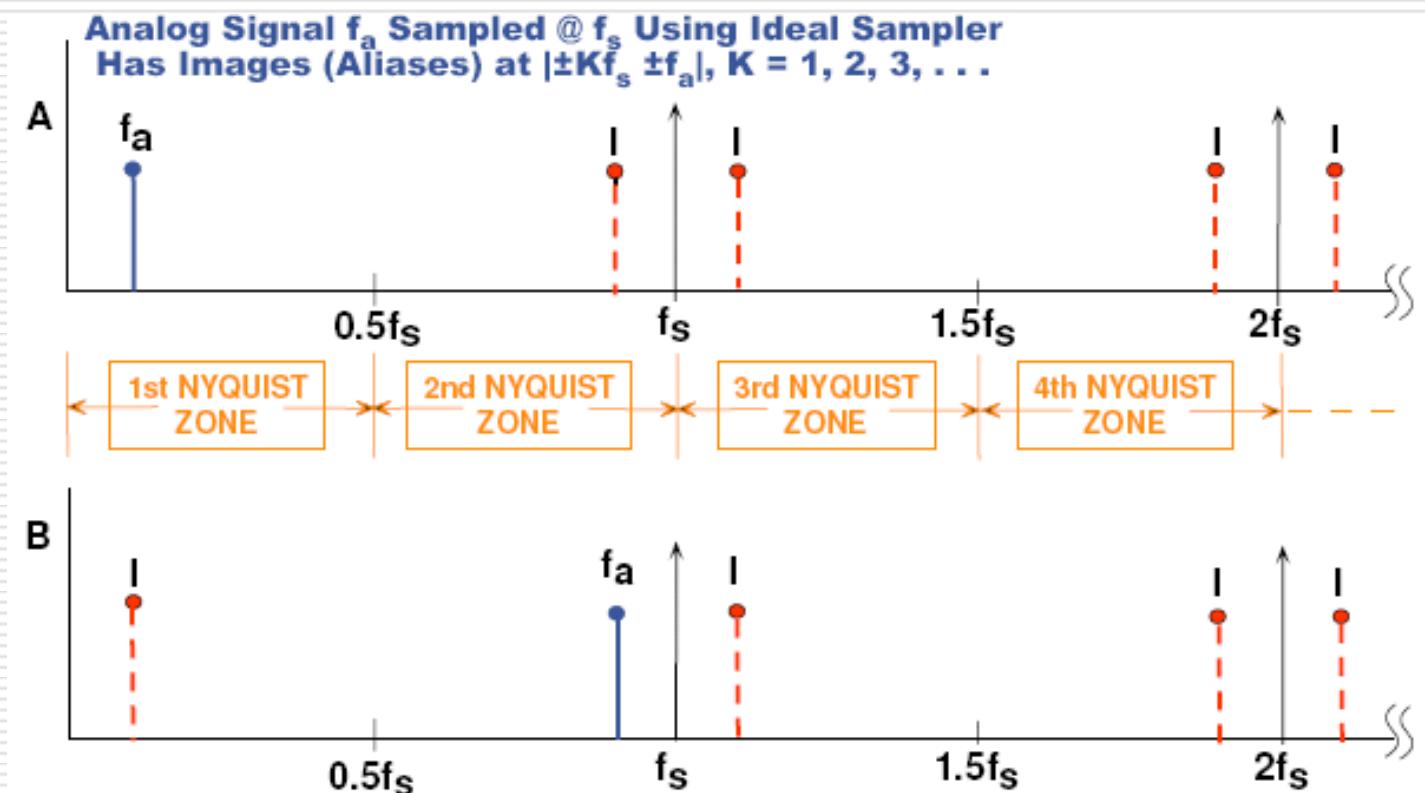
4.1. Увод

□ Дискретизация & Aliasing в честотната област



4.1. Увод

□ Дискретизация & Aliasing в честотната област



4.2. Сигма-делта АЦП

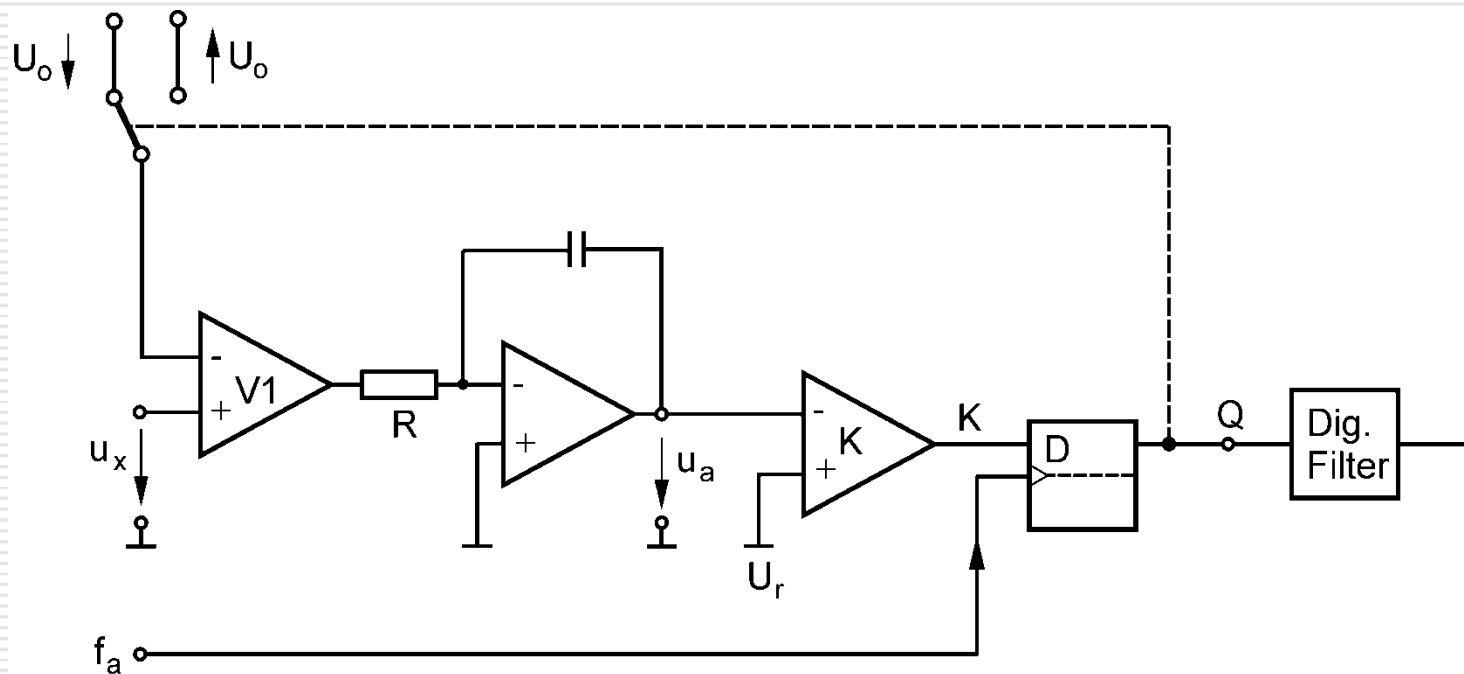
Индиректни АЦП

■ Индиректните АЦП генерират цифров сигнал в две стъпки:

- Преобразуват сензорния сигнал във времеви – честота или коефициент на запълване;
- Времевият сигнал се сравнява с еталонни времеви сигнали и се получава цифров код.

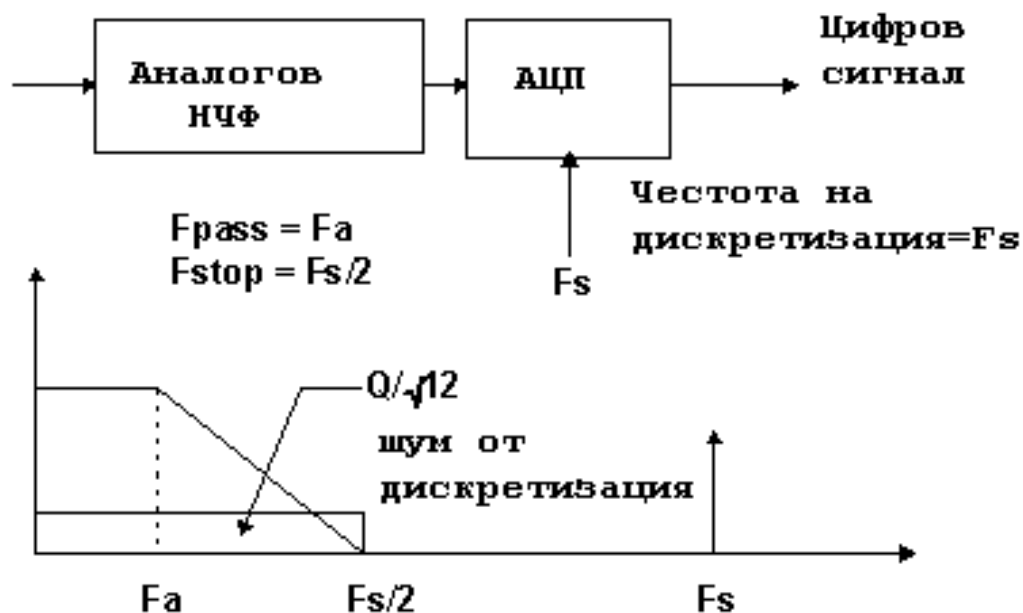
4.2. Сигма-делта АЦП

- Сигма-делта АЦП с дифференциален усилвател



4.2. Сигма-делта АЦП

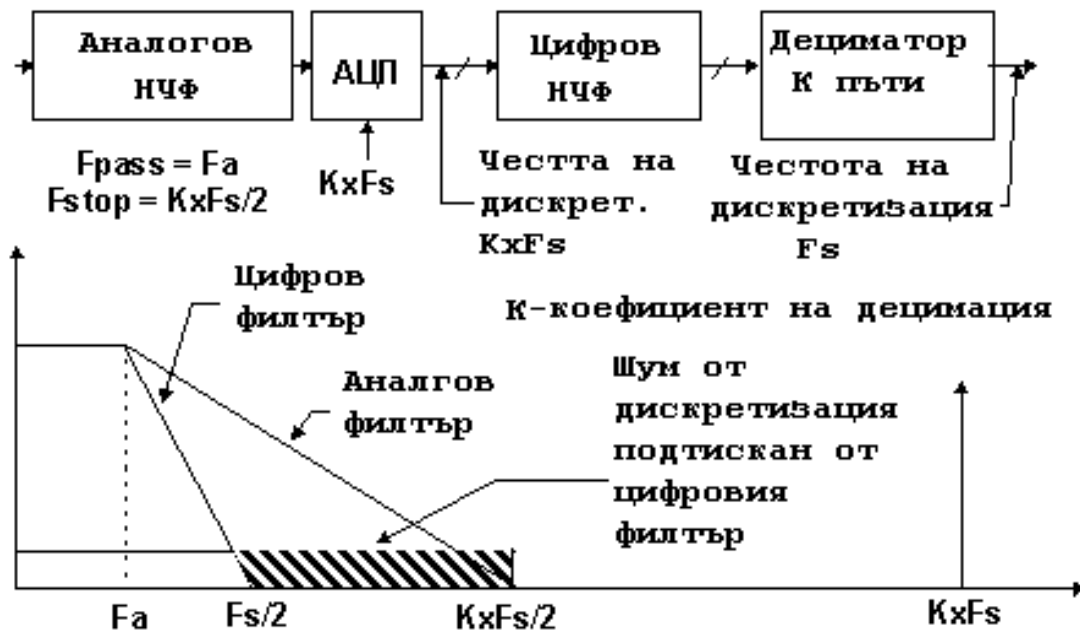
- Сигма-делта АЦП – основни концепции
 - Дискретизация с използване на нискочестотен филтър



4.2. Сигма-делта АЦП

- Сигма-делта АЦП – основни концепции
 - Предискретизация с аналогово и цифрово филтрание

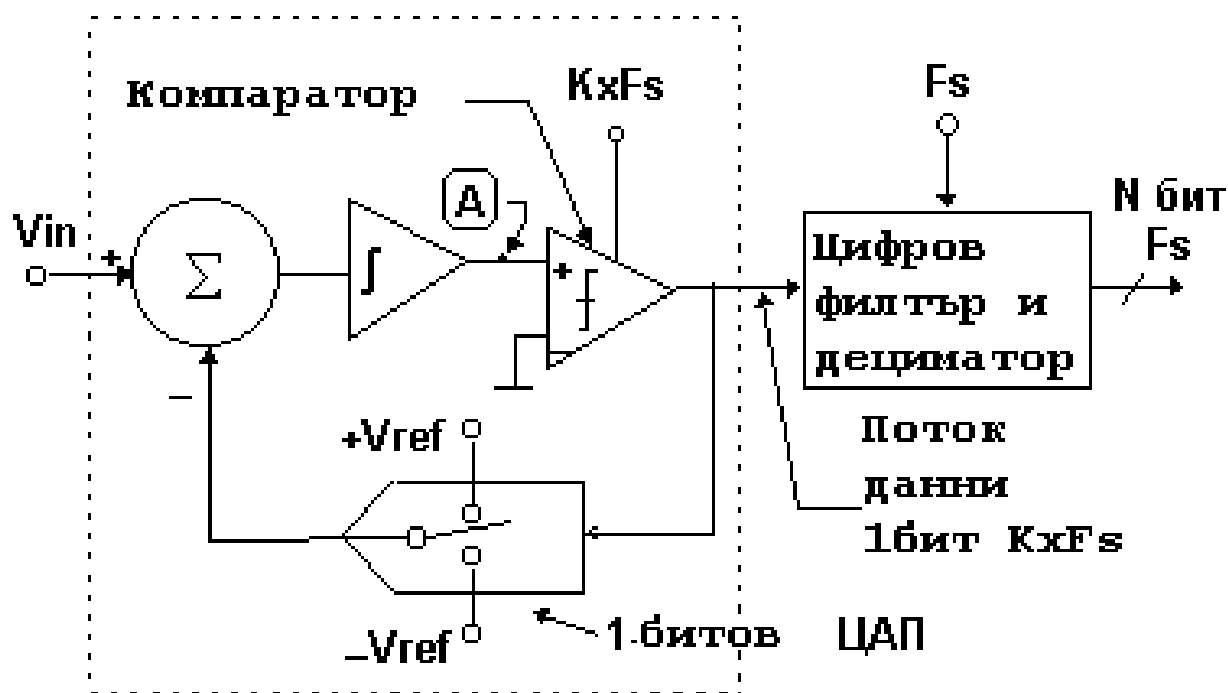
$$\text{SNR} = (6,02n + 1,76)\text{dB} + 10\lg \frac{f_s}{2f_a} \text{dB}$$



4.2. Сигма-делта АЦП

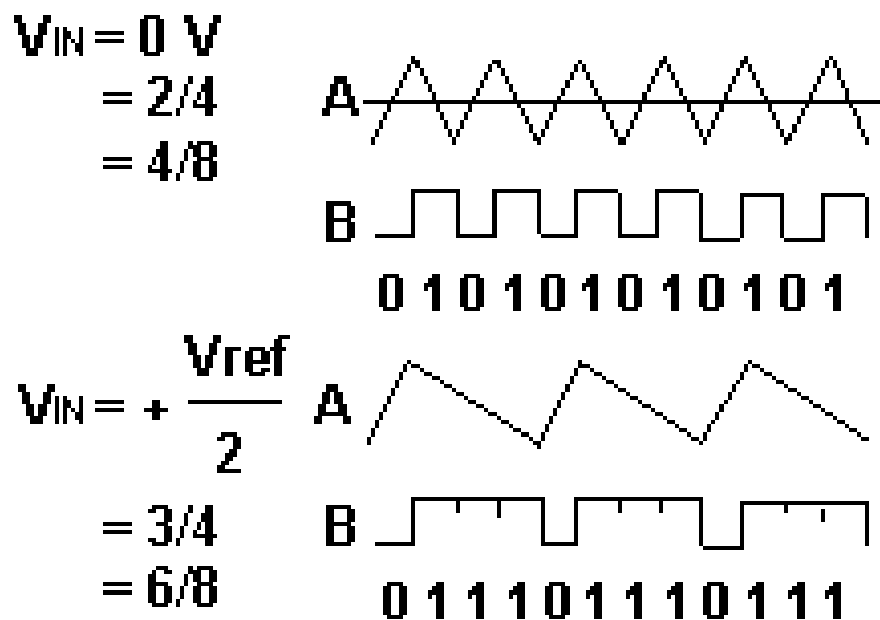
□ Сигма-делта АЦП – основни концепции

- Сигма-делта АЦП от първи ред.



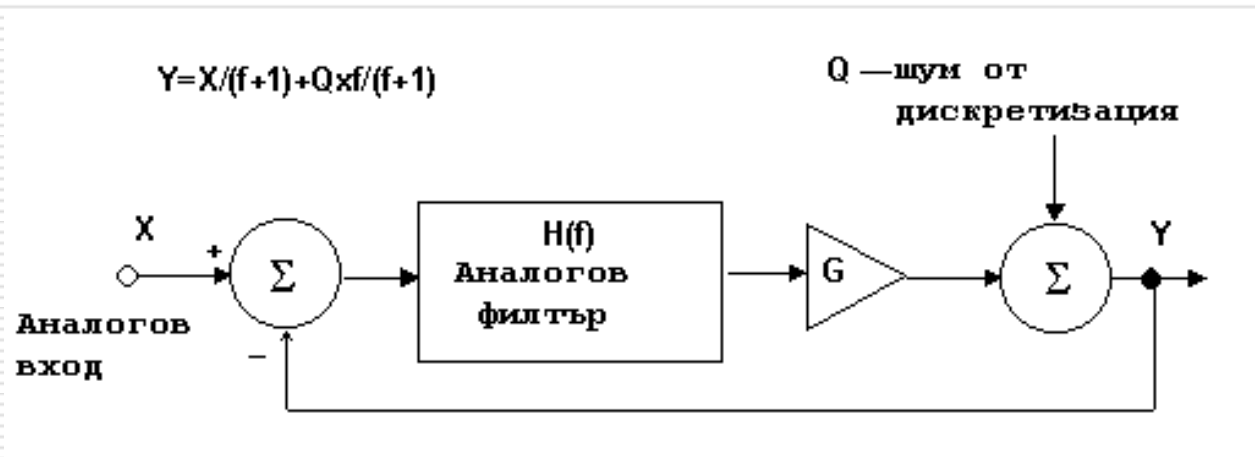
4.2. Сигма-делта АЦП

- Сигма-делта АЦП – основни концепции
Форма на сигналите на сигма-делта модулатора.



4.2. Сигма-делта АЦП

□ Линеен модел на сигма-делта модулатор



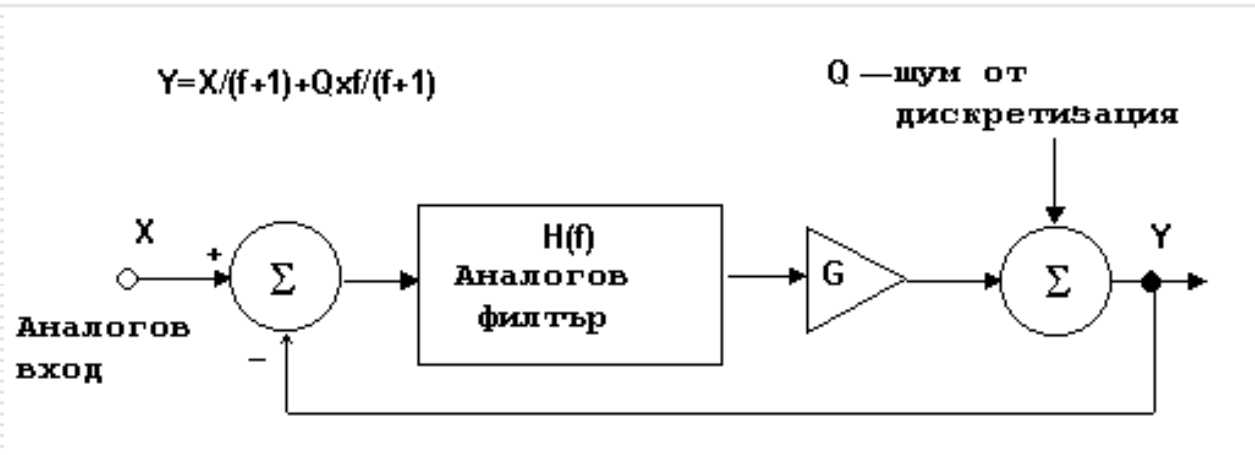
■ За полезния сигнал НЧ-филтър

$$Y(s) = (X(s) - Y(s)) \frac{1}{s}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{s}} = \frac{1}{1+s}$$

4.2. Сигма-делта АЦП

□ Линеен модел на сигма-делта модулатор



■ За шума – ВЧ-филтър

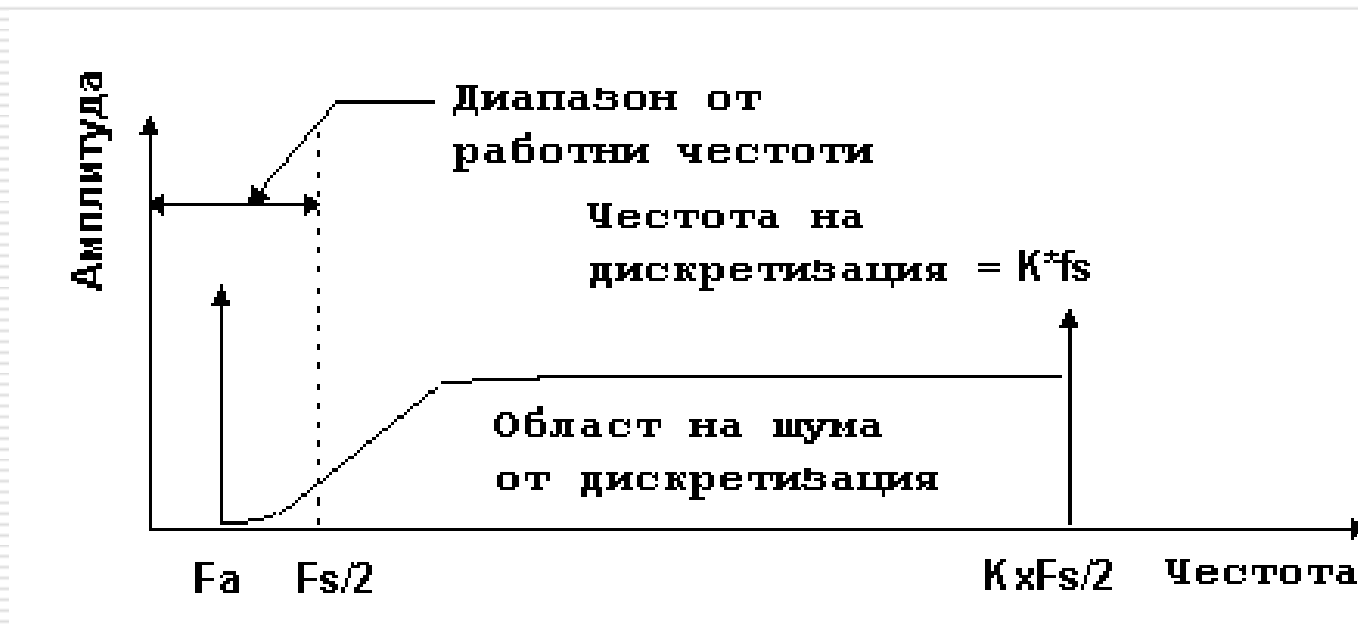
$$Y(s) = -Y(s) \frac{1}{s} + Q(s)$$

$$\frac{Y(s)}{Q(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{s}} = \frac{s}{1+s}$$

4.2. Сигма-делта АЦП

□ Сигма-делта АЦП

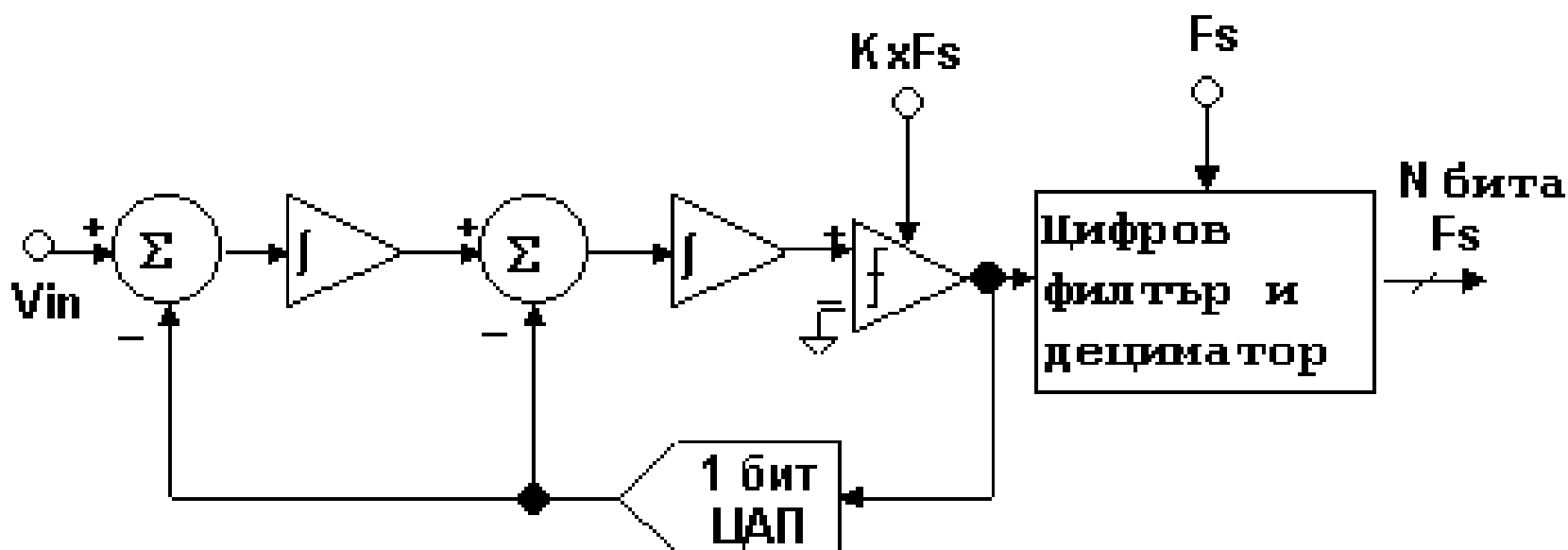
Преразпределение на шума от дискретизация.



4.2. Сигма-делта АЦП

□ Сигма-делта АЦП – основни концепции

- Сигма-делта АЦП от втори ред



Задача 4.2 [Mühl14, S.75]

- Обхватът на входните напрежения на линеен 8-битов аналогово-цифров преобразувател е от 0 до 5V.
- a) Да се изчисли броят на дискретните стойности по ниво (стъпки на квантуване).
- b) Да се изчисли (десетичният) код $Code_{10}$, който ще се получи на изхода на АЦП, при измерване на напрежение от 1,37V
- c) На какво входно напрежение съответства код $Code_{10} = 110_{10}$
- d) Какво е нивото на максималната грешка от дискретизация?

Задача 4.2

- a) брой на дискретните стойности по ниво (стъпки на квантуване):
(0 до $(2^8-1) = 255$,
Големина на стъпка $V = 5V / 255 = 19,6mV$.
- b) (десетичният) код $Code_{10}$, който ще се получи на изхода на АЦП, при измерване на напрежение от $1,37V$ $Code_{10} = 255 * 1,37V / 5V = 70$

Задача 4.2

c) На какво входно напрежение
съответства код $Code_{10} = 110_{10}$
 $U = 110 * 19,6mV = 2,156V.$

d) Максимална грешка от дискретизация.
 $(19.6 / 2) = 9,8mV.$

Задача 4.5.

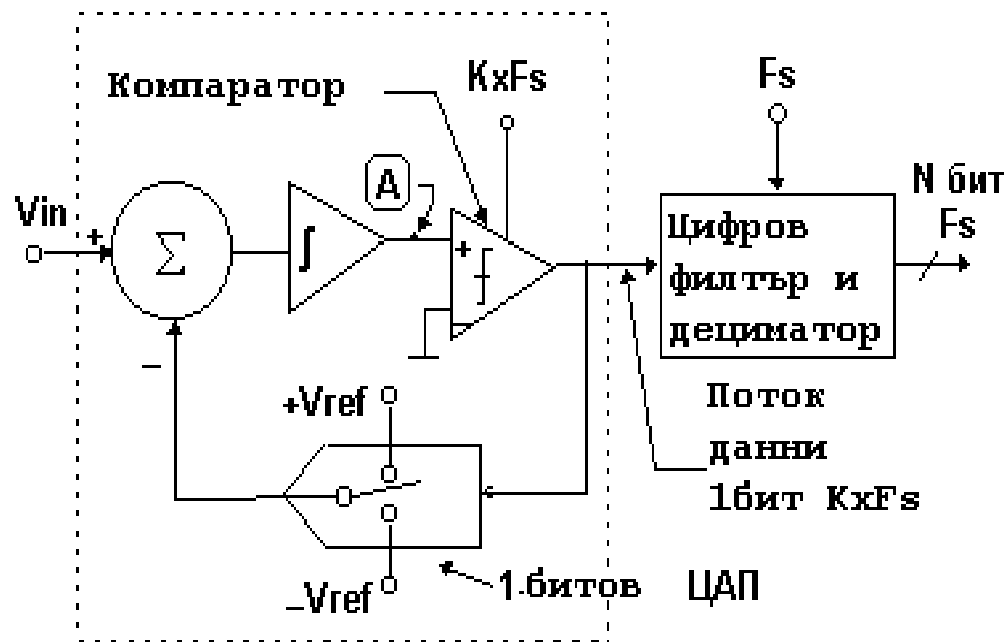
Сигма-делта АЦП [Lebelt A62, S.81 , 267]

- a) Начерайте структурата на сигма-делта АЦП от първи ред.
- b) Какво се постига чрез предискретизация (Oversampling) и преразпределение на шума от дискретизация (Noise Shaping)?
- c) Какъв коефициент на предискретизация е необходим за да се постигне подобряване на отношението сигнал-шум с 1, 2, 3, 4, 6, 23 бита в случай, че АЦП работи **без или с** преразпределение на шума от дискретизация?

Задача 4.5.

Сигма-делта АЦП

а)

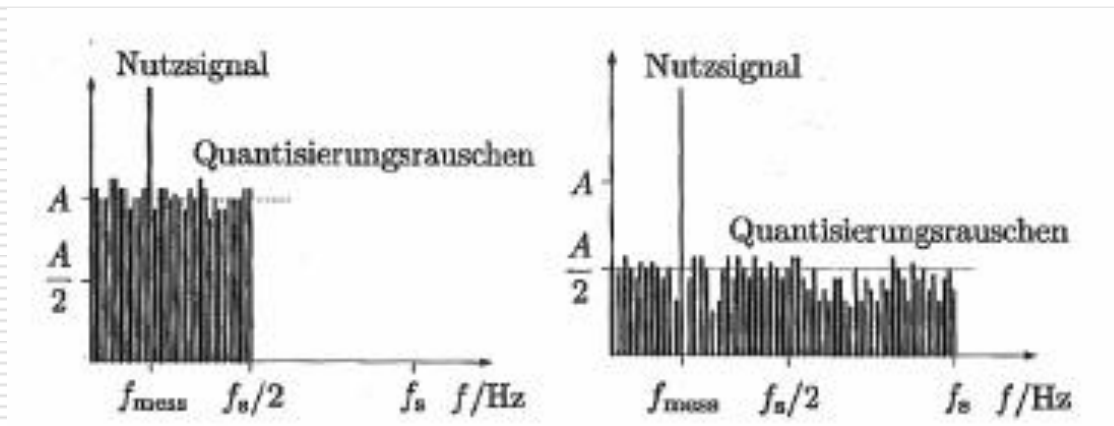


Задача 4.5.

Сигма-делта АЦП

б) Предискреизация.

- Дискретизацията с честота по-висока от два пъти честотата на полезния сигнал (критерий на Найкуист) редуцира шума от дискретизация, генериран при 1-битовата дискретизация.
- Съотношението сигнал / шум се подобрява.



Задача 4.5.

Сигма-делта АЦП

- b) Преразпределение на шума от дискретизация (Noise Shaping).
- Останалият след предискретизацията шум се преразпределя, така че шумовите компоненти с ниска честота, се редуцират в областта на полезния сигнал, докато високочестотните шумови компоненти се усилват, след което се филтрират с НЧ филтър.
 - Преразпределението на шума от дискретизация води до нискочестотно филтриране на полезния сигнал и висококочестотно филтриране на шума.
 - Съотношението сигнал / шум се подобрява.

Задача 4.5.

Сигма-делта АЦП

с) без преразпределение на шума от дискретизация.

■ В общия случай: $SNR = (6,02n + 1,76)dB$.

■ При предискретизация без преразпределение на шума $SNR = (6,02n + 1,76) + 10 \log OSR dB$

■ Коэффициент на предискретизация $OSR = \frac{f_s}{2f_0}$.

Задача 4.5.

Сигма-делта АЦП

с) **без** преразпределение на шума от дискретизация.

■ Постигнато допълнително подобрене на отношението сигнал-шум: $\Delta SNR = 10 \log OSR \text{ dB}$

■ Оттук за коефициента на предискретизация

$$OSR = 10^{\frac{\Delta SNR}{10 \text{ dB}}}$$

n, Bit	1	2	3	4	6	23
$\Delta SNR, \text{ dB}$	7,78	13,80	19,82	25,84	37,88	140,22
OSR	6	24	96	384	6138	$1,05 \cdot 10^{14}$

Задача 4.5.

Сигма-делта АЦП

с) с преразпределение на шума от дискретизация.

■ $SNR = (6,02n + 1,76)dB + (-5,17 + 30 \log OSR)dB .$

■ Постигнато допълнително подобрене на отношението сигнал-шум:

$$\Delta SNR = (-5,17 + 30 \log OSR) dB$$

■ Коефициент на предискретизация:

$$OSR = 10^{\frac{\Delta SNR/dB + 5,17}{30dB}}$$

Задача 4.5.

Сигма-делта АЦП

с) с преразпределение на шума от дискретизация.

n, Bit	1	2	3	4	6	23
$\Delta SNR, \text{dB}$	7,78	13,80	19,82	25,84	37,88	140,22
<i>OSR</i>	3	5	7	11	28	70200

Задача 4.6.

Характеристики на АЦП

- За 12-битов АЦП са дадени следните характеристики.

Parameter	Spec	Units
DYNAMIC PERFORMANCE		
SINAD \approx SNR	67	dB
Aperture Delay	5	ns
Aperture Jitter	100	ps
Throughput Rate	1	MSPS
Full Scale Range	3.3	V
DC ACCURACY		
Integral Nonlinearity	± 0.6	mV
Differential Nonlinearity	± 0.5	mV
Gain Error	± 1.5	mV
Offset Error	± 1	mV

Задача 4.6.

Характеристики на АЦП

Parameter	Spec	Units
DYNAMIC PERFORMANCE		
SINAD \approx SNR	67	dB
Aperture Delay	5	ns
Aperture Jitter	100	ps
Throughput Rate	1	MSPS
Full Scale Range	3.3	V
DC ACCURACY		
Integral Nonlinearity	± 0.6	mV
Differential Nonlinearity	± 0.5	mV
Gain Error	± 1.5	mV
Offset Error	± 1	mV

- За 12-битов АЦП са дадени характеристиките.
- Изчислете максималната грешка от дискретизация.
 - Изчислете ефективния брой битове въз основа на параметъра SINAD.
 - Изчислете ефективния брой битове като се вземат предвид всички грешки от нелинейност и допълнително грешките от отместване на нулата и от усилването.



Задача 4.6.

Характеристики на АЦП

- a) Изчислете максималната грешка от дискретизация.

$$\frac{LSB}{2} = \frac{FSR}{2^{12}} = 0,4 \text{ mV}$$

- b) Изчислете ефективния брой битове въз основа на параметъра SINAD.

$$ENOB = \frac{SINAD - 1,76}{6,02} = 10,8$$

Задача 4.6.

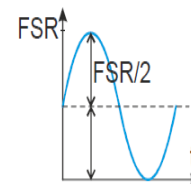
Характеристики на АЦП

- с) Изчислете ефективния брой битове като се вземат предвид всички грешки от нелинейност и допълнително грешките от отместване на нулата и от усилването.

$$e = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{0,4^2 + 0,6^2 + 0,5^2 + 1,5^2 + 1^2} \text{ mV} = 1,15 \text{ mV}$$

$$V_{eff}^{sig} = \frac{FSR}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,167 \text{ V}$$

$$U_{sig}^{eff} = \frac{FSR/2}{\sqrt{2}} = \frac{2^b \cdot LSB}{\sqrt{8}}$$



$$\delta = \frac{1,15 \text{ mV}}{1167 \text{ mV}} = 0,0099 \quad \rightarrow$$

$$SINAD = 20 \cdot \lg \frac{1}{\delta} \approx 60 \text{ dB} \quad \rightarrow \quad ENOB = 9,71 \text{ bit!}$$