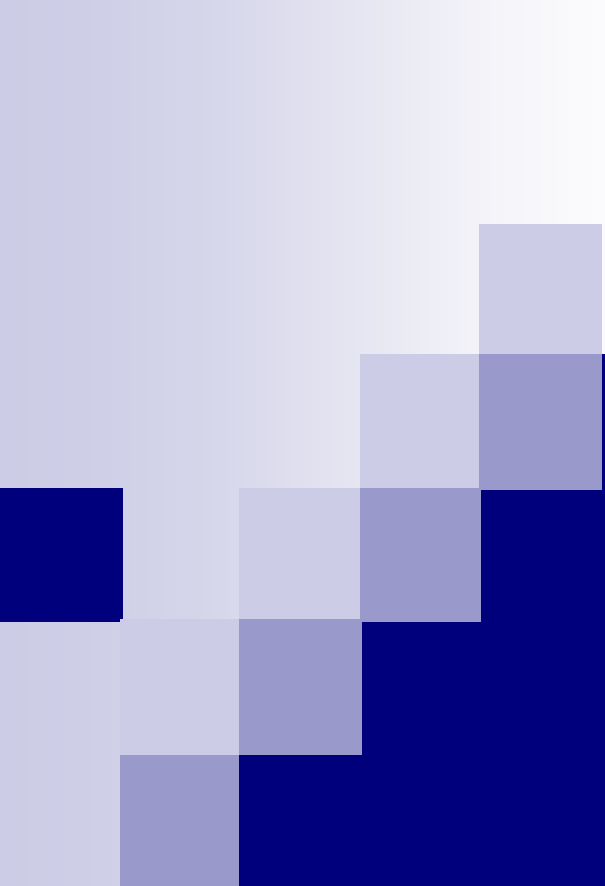




Vhodno-izhodne naprave (VIN)

Predavanja

3. Prenos podatkov

Robert Rozman

rozman@fri.uni-lj.si

Vsebina

Prenos podatkov

1. Paralelni prenos
2. Serijski prenos

Primeri, primerjave

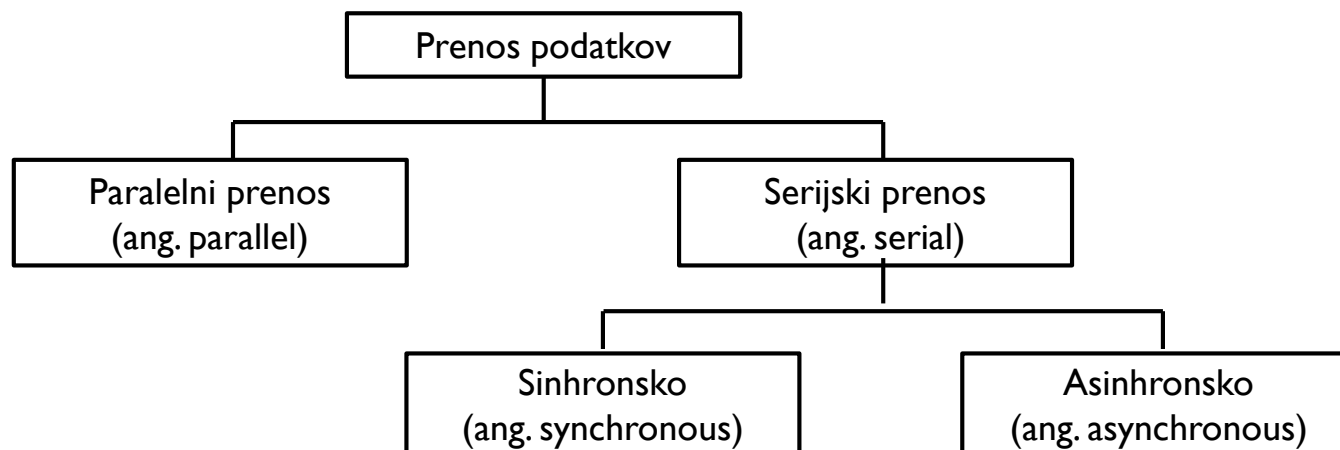
3. Način (smer) prenosa
 - 3.1 Enosmerni prenos (ang. simplex)
 - 3.2 Dvosmerni izmenični prenos (ang. half duplex)
 - 3.3 Dvosmerni istočasni prenos (ang. full duplex).
4. Izvedba serijskega prenosa podatkov (SERDES)
5. Hitrost prenosa podatkov
 - 5.1 Baudna hitrost
 - 5.2 Bitna hitrost

Vir: https://www.youtube.com/watch?v=cBZUckBCy-U&ab_channel=PohKG

Prenos podatkov

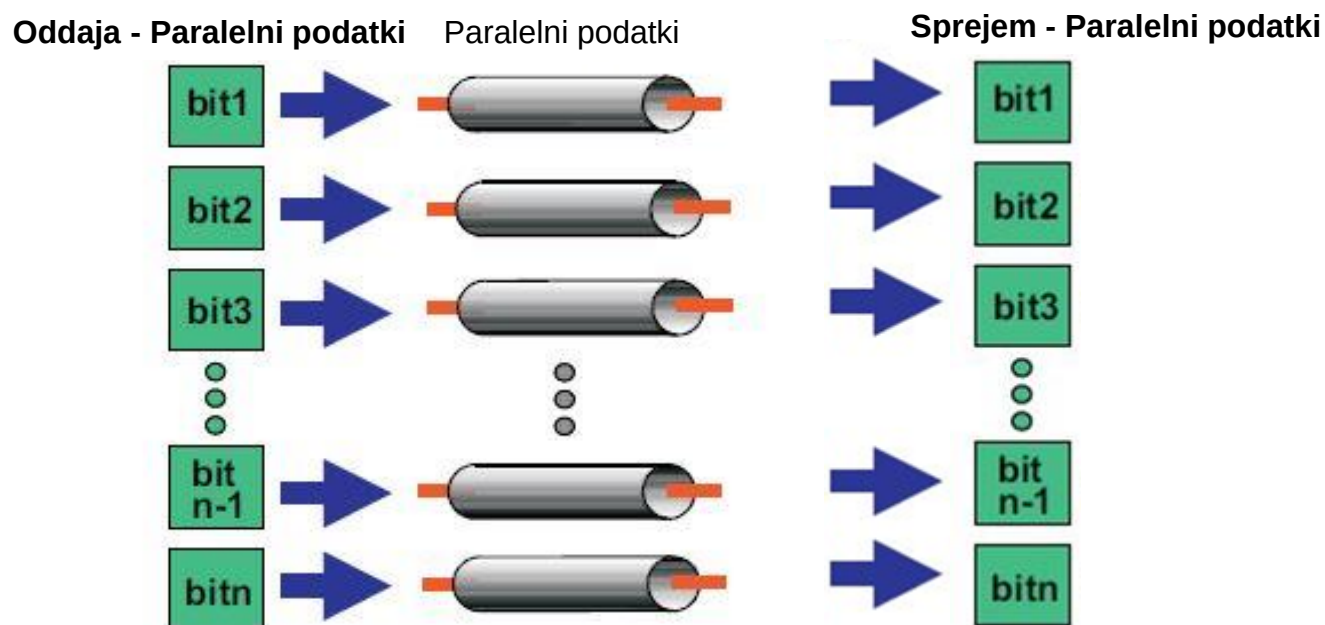
- ❑ Prenos podatkov se nanaša na pošiljanje bitov med dvema ali več digitalnimi napravami z uporabo enega od prenosnih medijev.
 - **Notranji prenos:** podatki se prenašajo med različnimi enotami znotraj iste naprave.
Primer: Iz pomnilnika z naključnim dostopom (RAM) ali trdega diska se pošiljajo podatki procesorju.
 - **Zunanji prenos:** podatki prihajajo iz izvorne naprave in so posredovani do ciljne naprave.
Primer: Naprava posreduje podatkovni objekt ali datoteko eni ali več naprav.

❑ Vrste prenosa podatkov



1 Paralelni prenos

- ❑ Preko več paralelnih povezav se istočasno prenaša več bitov.
- ❑ Vsak bit potuje po svoji signalni povezavi.
 - Primer: Prenos n -bitnih podatkov ($n = 8, 16, 32, \dots$) poteka preko n -signalnih povezav ($n = 8, 16, 32, \dots$)
- ❑ Število povezav je določeno s številom hkrati prenesenih bitov.
 - Primer: Prenos 32-bitnega podatka iz pomnilnika v procesor poteka po 32-povezavah.



❑ Prednosti

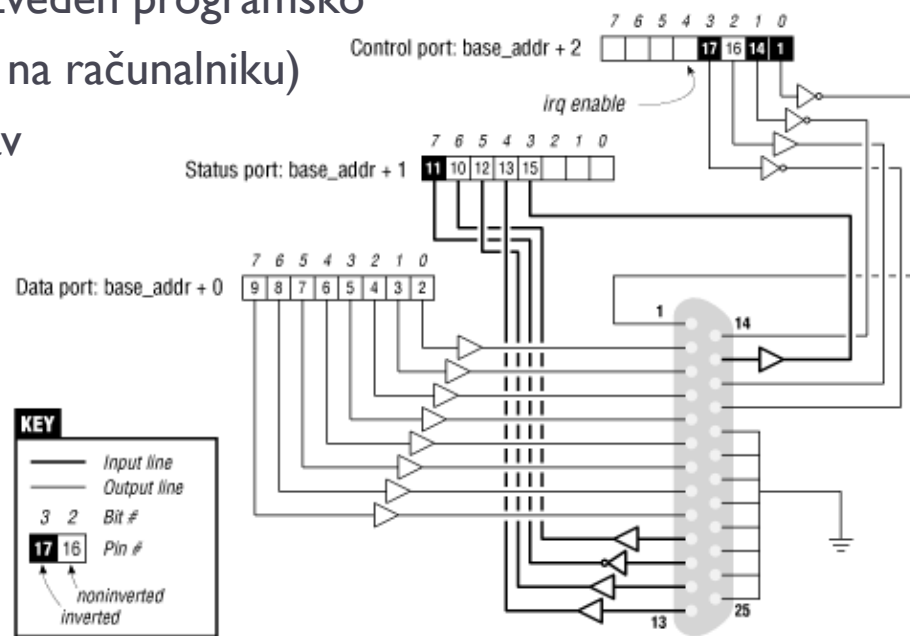
- Povečevanje hitrosti prenosa z večanjem širine povezave.
- Minimalna latenca (ang. latency) – minimalna zakasnitev od zahteve za podatke, do sprejema podatkov.
- Programski protokoli za paralelne vmesnike pogosto uporabljajo določene bite za nadzor prenosa in s tem omogočajo večje hitrosti prenosa.

❑ Slabosti

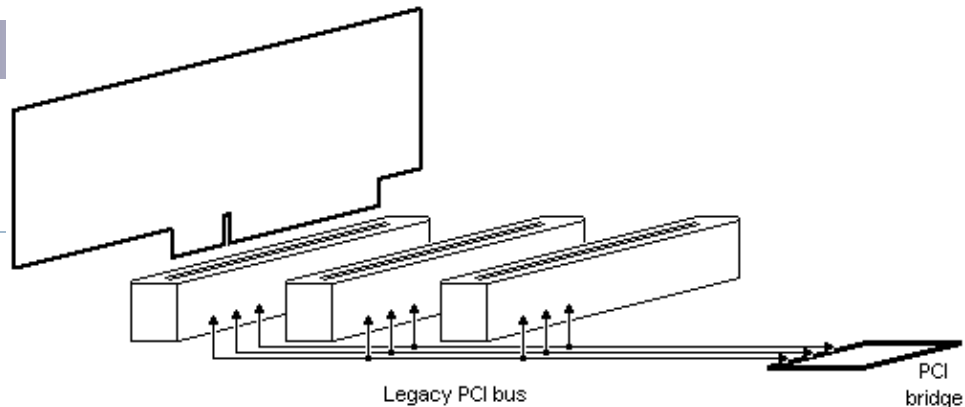
- Razdalje ne smejo biti prevelike zaradi medsebojnega vpliva paralelnih povezav (presluh, različne zakasnitve).
- Največja hitrost prenosa je omejena z razliko v času potovanja signalov po različnih poteh.
- Paralelne povezave zahtevajo več prostora na tiskanem vezju (več oddajnikov več sprejemnikov, več povezav).
- Večja poraba energije, višja cena.

Primer uporabe paralelnega prenosa podatkov: „PC - Paralelni port“

- ❑ osebni računalnik (PC) → izhodne naprave
- ❑ Potrebujemo vmesnik - Paralelni priključek za zunanje naprave (Parallel (or Printer) Port Interface (LPT I-Line Print Terminal I))
 - Zasnovan je bil za povezavo računalnika s tiskalnikom, a se je zaradi enostavnosti uporabljal tudi za druge povezave.
 - PC ima konektor DB 25
 - Paralelni prenos podatkov je v celoti izveden programsko (podatki se vpišejo v V/I pomnilnik na računalniku)
podrobneje pri delovanju V/I naprav



Primer paralelnega vodila: PCI



Primer naraščanja potreb:

- „SD“ ekran 1024*768*3B/točko*30slik/s
=76.5MB/s (135MB/s , 2 hkrati preko pomn.)
- „Full HD“ ekran
1920*1080*3B/točko*30slik/s≈155MB/s
(310MB/s , 2 hkrati preko pomn.)

Razvoj:

- **1990: PCI (Peripheral Component Interconnect bus)** 33Mhz, 32bitov/cikel≈**133 MB/s**
- **1995: PCI 2.1:** do 66Mhz in 64bitov/cikel≈**528 MB/s**
- **1997 ~ 2010: AGP (»Accelerated Graphics Port«) (PCI ne zadošča več)**
 - **AGP1.0:** 264-533 MB/s,
 - **AGP2.0:** 1066 MB/s,
 - **AGP3.0,3.5:** 2133 MB/s,
- -----
- **~ 2010 +: PCI Express (hitra serijska povezava)**

Primer paralelnega vodila: PCI

Značilnosti PCI vodila:

- sinhronsko vodilo
- nasl. in podatkovni signali multipleksirani:
 - **dobro:** manj pinov
 - **slabo:** daljši prenosi, vsaj 3 cikle !!!
- prenosi **master <-> slave**
- arbitražna centralizirana (vsaka naprava 2 signala REQ# in GNT#)

PCI signali :

- obvezni
 - za 32bitne prenose, master, slave
- neobvezni
 - predvsem razširitev na 64 bitov, prekinitve, multiprocesorska podpora

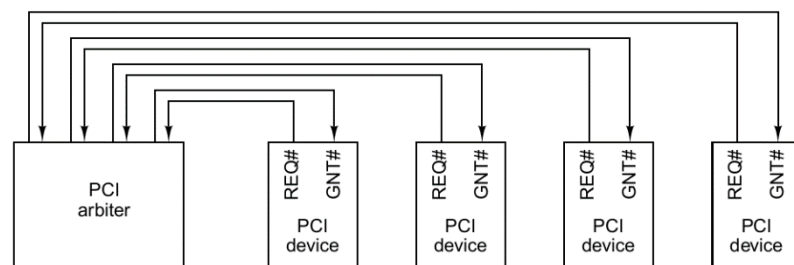
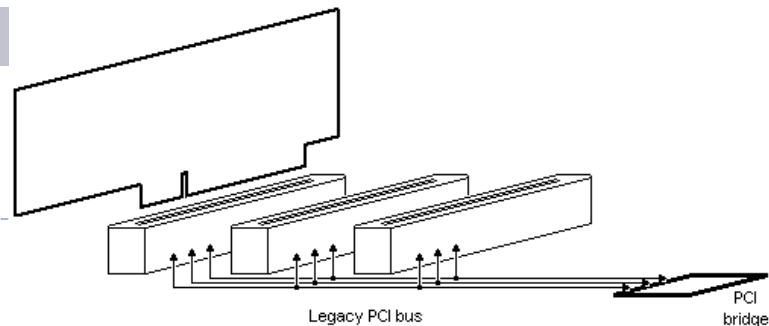
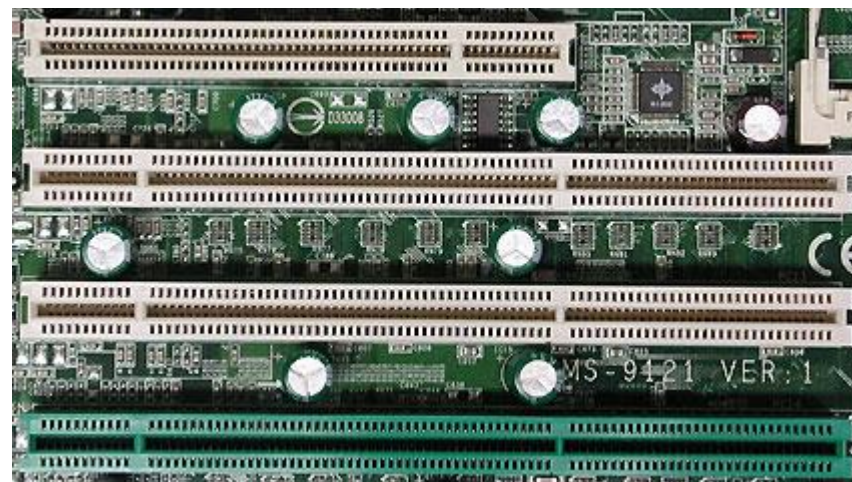
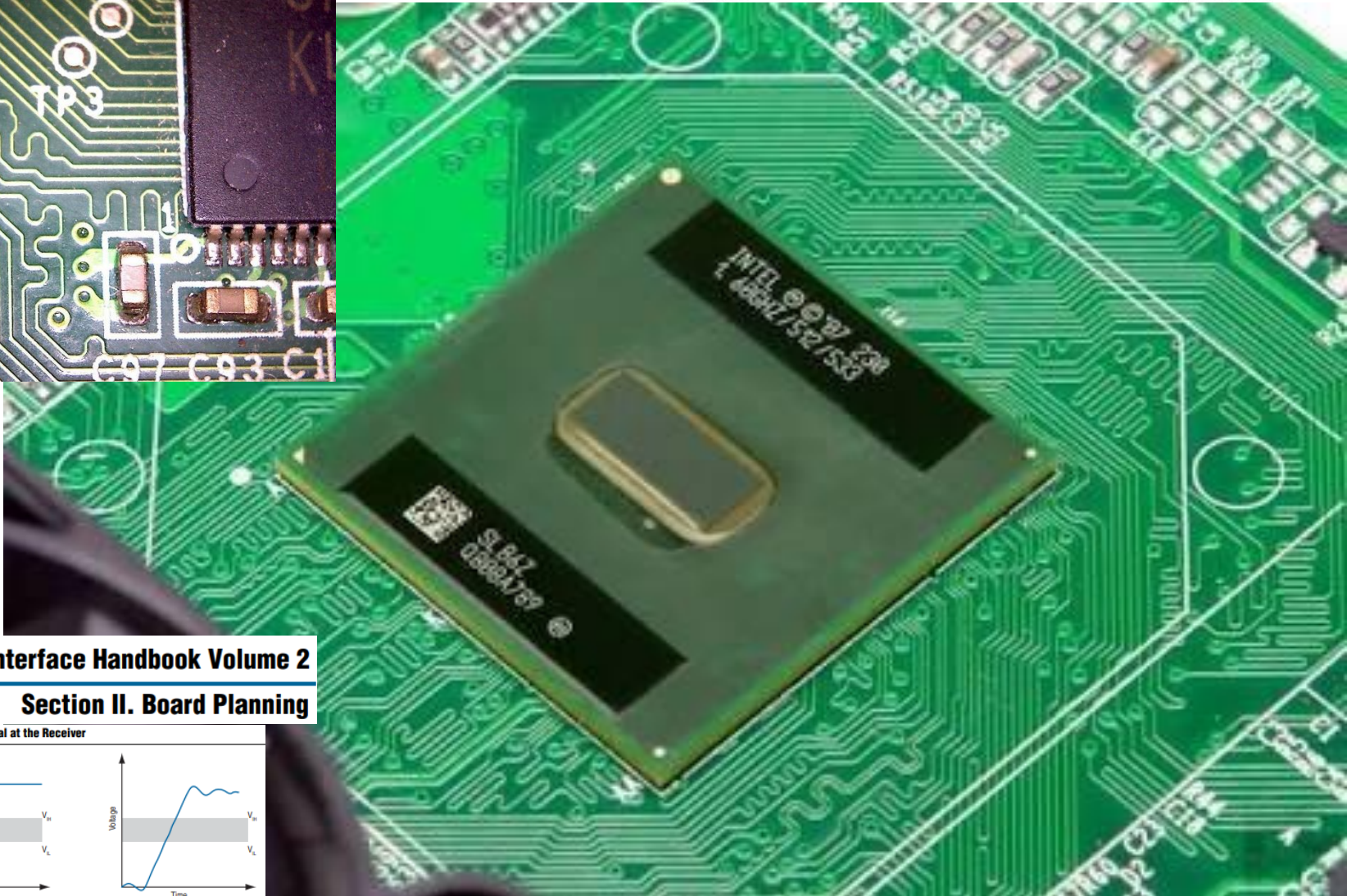
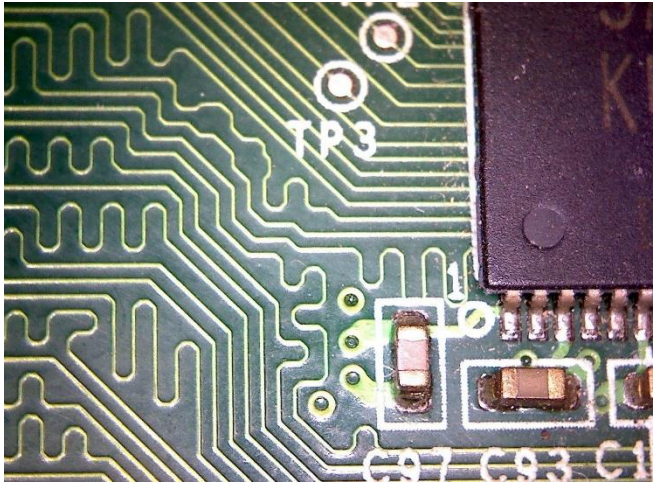
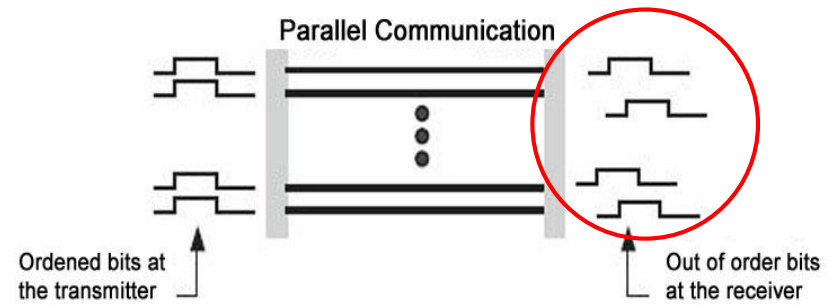


Figure 3-51. The PCI bus uses a centralized bus arbiter.



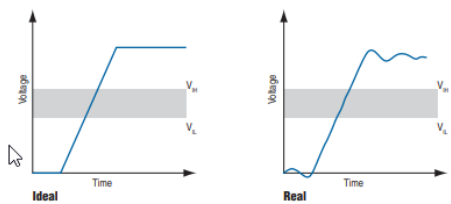
Paralelne povezave – kompenzacije različnih dolžin povezav



External Memory Interface Handbook Volume 2

Section II. Board Planning

Figure 1-1. Ideal and Real Signal at the Receiver

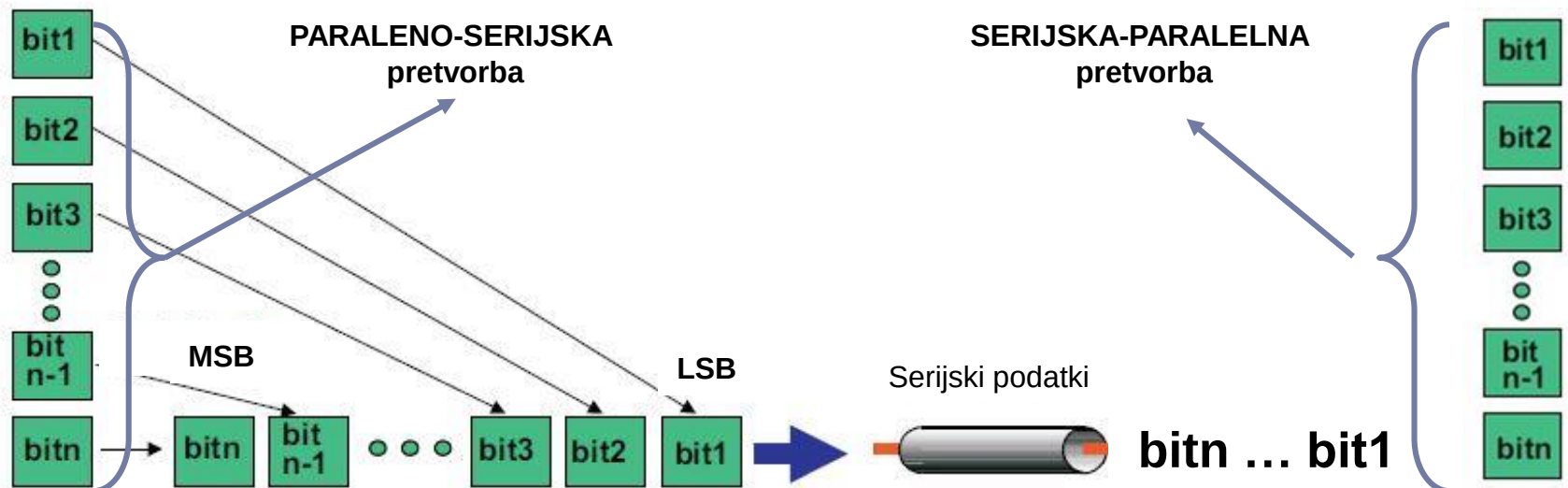


2 Serijski prenos

- Po eni povezavi se prenaša bit za bitom (prenos n-bitnih podatkov ($n = 8, 16, 32, \dots$) poteka zaporedno preko 1-signalne povezave
- Potrebna je paralelno-serijska pretvorba pri oddaji in serijsko-paralelna pretvorba pri sprejemu.
- Na vhod povezave se običajno najprej odda najmanj pomemben bit (LSB), to je bit 1.
- Serijski podatki so z največjo hitrostjo posredovani po liniji v smeri sprejemnika.

Paralelni podatki

Paralelni podatki



❑ Prednosti

- Ni časovnega zamika med signali v povezavah (ang. time skew).
- Za prenos je potrebnih manj povezav (manj žic, cenejši kabli in konektorji).
- Povezave zasedejo manj prostora.
- Poraba energije na bit je manjša.

❑ Slabosti

- Serijske povezave so v splošnem omejene na povezave točka-v-točko (dve napravi sta povezani med seboj s serijsko povezavo).
- Za enake kapacitete kot pri paralelnem prenosu so potrebne višje hitrosti prenosa.
- Z višanjem hitrosti prenosa pa se krajšajo razdalje.
- Večja latenca (ang. latency) – večja zakasnitev od zahteve za podatke do sprejema podatkov.

2.1 Asinhronski prenos (ang. asynchronous transmission):

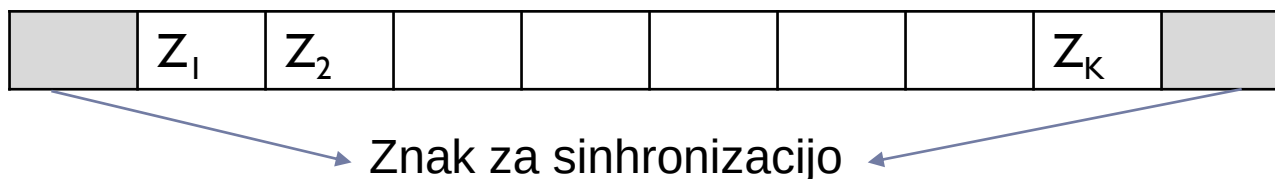
- Pošilja se samo en znak naenkrat, ki je lahko črka abecede ali število ali krmilni znak (pošilja se en bajt podatka naenkrat).
- Sinhronizacija bitov med dvema napravama je omogočena z uporabo začetnega bita (START) in končnega bita (STOP).
- Velikost znaka za pošiljanje se iz 8 bitov poveča na 10 bitov.
- Primer:

STOP bit	Znak (V)	START bit
1	0 1 0 1 0 1 1 0	0

- Med prenosom različnih bajtov je lahko čas mirovanja ali razmik, ki je poznan tudi kot vrzel.
- Sinhronizacija ni potrebna na ravni bajtov – potrebna je znotraj bajta:
 - prejemnik lahko z dodanimi biti določi kako prevesti podatke.
 - sprejemnik je sinhroniziran z dohodnim bitnim tokom.
- Primer uporabe: elektronska pošta (e-mail)

2.2 Sinhronski prenos (ang. synchronous transmission):

- Podatki se prenašajo v usklajenem pristopu v obliki delčkov, blokov ali okvirjev.
- Sinhronizacija je potrebna med oddajnikom in sprejemnikom – znak za sinhronizacijo ali urin signal.
- Primer: Sinhronski prenos K znakov ($Z_1, Z_2, \dots, Z_K$), ki ima dodana znak za sinhronizacijo



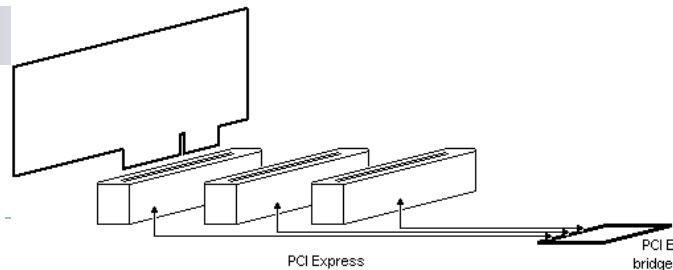
- Komunikacija med povezanimi napravami poteka v realnem času.
- Primer sinhronskega prenosa:
 - video konferenca,
 - pogovor (ang. chat).

Primer uporabe serijskega prenosa podatkov

- ❑ **Asinhronski način** prenosa podatkov – naprave nimajo zunanjega urinega signala
 - **UART** (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
 - **RS232 (v PC)**
 - **CAN** (Control Area Network Bus)

- ❑ **Sinhronski način** prenosa podatkov - naprave imajo skupen urin signal (Clock) za katerega je potrebna dodatna povezava.
 - **USART** (Universal Synchronous-Asynchronous Receiver-Transmitter)
 - **RS232 ()** : specifikacije standarda omogočajo tudi sinhronski način.
 - **USB** (Universal Serial Bus)
 - **I2C or I²C** (Inter-Integrated Circuit, pronounced as “I squared C” or “I two C”)
 - **SPI** (Serial Peripheral Interface)

Primer hitre serijske povezave : PCI Express (P2P)



Razvoj: ~ 2010 +: *PCI Express (hitra serijska povezava)*

PCI Express link performance^{[45][46]}

Version	Intro-duced	Line code		Transfer rate per lane ^{[7][10]}	Throughput ^{[7][10]}				
					×1	×2	×4	×8	×16
1.0	2003	NRZ	8b/10b	2.5 GT/s	0.250 GB/s	0.500 GB/s	1.000 GB/s	2.000 GB/s	4.000 GB/s
2.0	2007		8b/10b	5.0 GT/s	0.500 GB/s	1.000 GB/s	2.000 GB/s	4.000 GB/s	8.000 GB/s
3.0	2010		128b/130b	8.0 GT/s	0.985 GB/s	1.969 GB/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s
4.0	2017		128b/130b	16.0 GT/s	1.969 GB/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s	31.508 GB/s
5.0	2019	PAM-4 FEC	128b/130b	32.0 GT/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s	31.508 GB/s	63.015 GB/s
6.0	2022		242B/256B FLIT	64.0 GT/s 32.0 Gb/s	7.563 GB/s	15.125 GB/s	30.250 GB/s	60.500 GB/s	121.000 GB/s

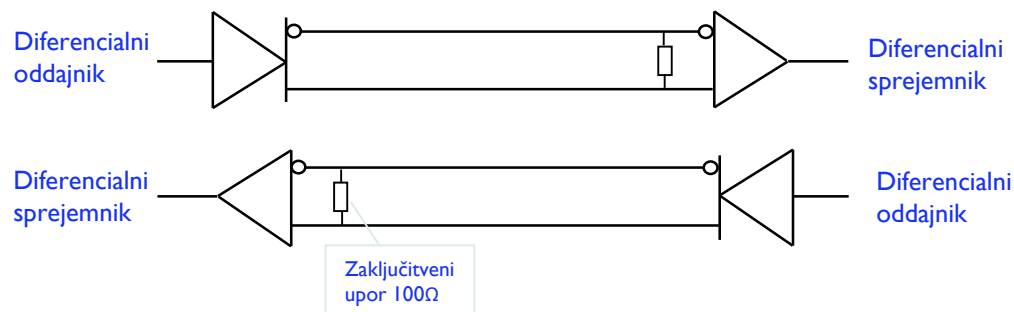
PCIe v1.x (f=2.5GHz):

- teoretično bi vsak kanal imel **2.5Gbps**
- zaradi **8b/10b** kodiranja vsak kanal **2Gbps**
 $2,5\text{Gb/s} \cdot 8/10 = 2\text{Gb/s} = 250\text{MB/s}$

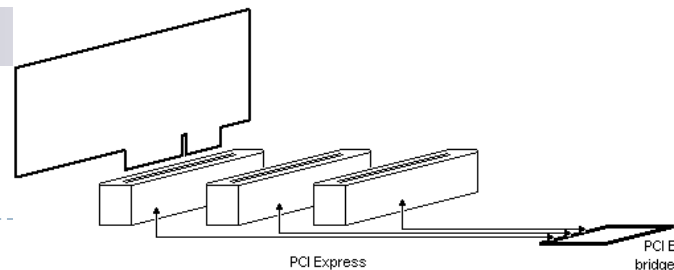
x1 povezava PCI Express (PCIe):

- dve simetrični (diferencialni) povezavi z LVDS (Low Voltage Differential Signaling) predstavitvijo,
- vsaka v eno smer (full duplex).

PCIe x1 enojna dvosmerna povezava - full-duplex

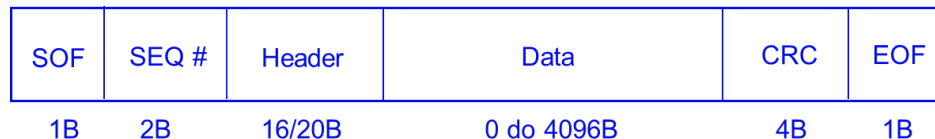


Primer hitre serijske povezave : PCI Express (P2P)



Podatki se prenašajo v obliki okvirjev, ki jih sestavljajo:

- Začetni bajt (Start of Frame - SOF)
- Zaporedna številka (Sequence Number - SEQ #)
- Glava Header)
- Podatki (Data)
- CRC - biti za detekcijo in korekcijo napak
- Končni bajt (End of Frame - EOF)



PCI Express protokolski sklad

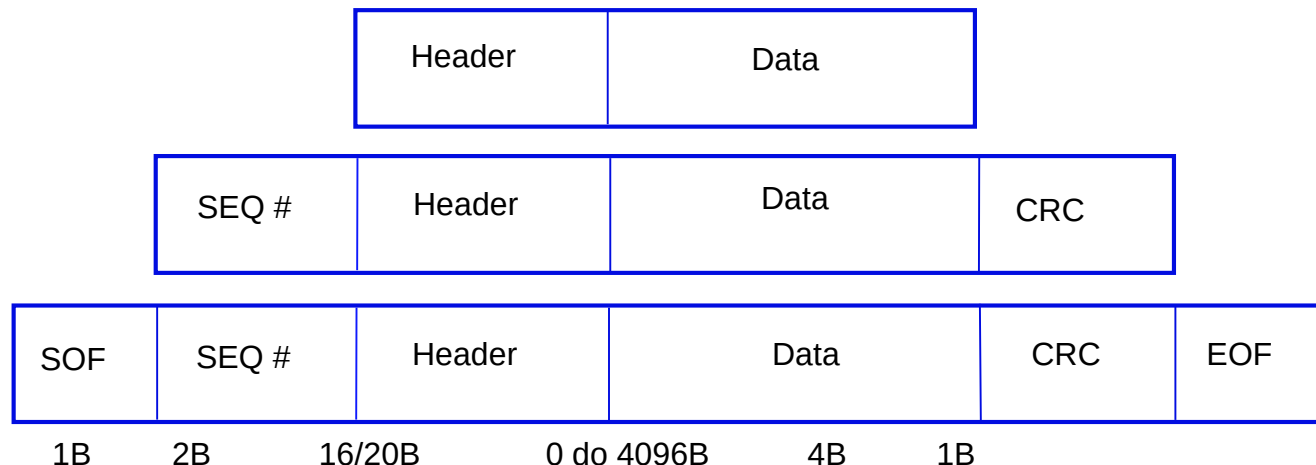
Povezuje PCI Express sistem z operacijskim sistemom

Programska plast

Transportna plast

Povezovalna plast

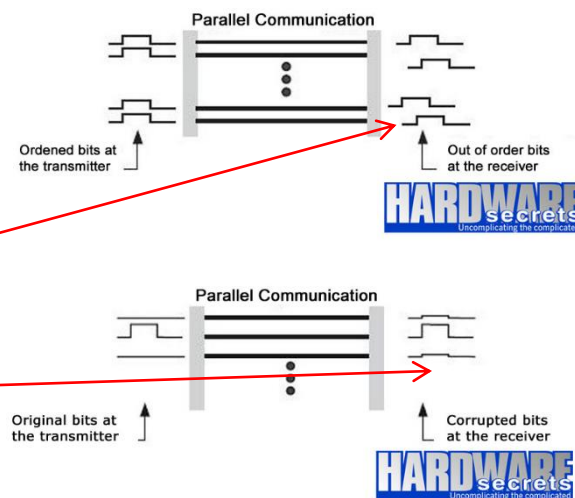
Fizična plast



Zakaj so danes bolj zmogljive povezave serijske ? (PCI Express, SATA, Firewire, Gigabit ETH, DVI,HDMI)

❑ Slabosti paralelnih povezav v primerjavi s serijskimi:

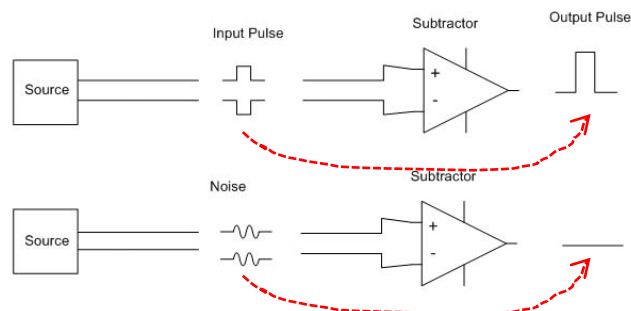
- ❑ veliko število povezav, več prostora, večji konektorji
 - ❑ diferencialni prenos bi še podvojil število povezav
- ❑ več elementov (oddajniki/sprejemniki), več porabe na bit
- ❑ omejena hitrost
 - ❑ različne zakasnitve (različna dolžina povezav)
 - ❑ odboji
 - ❑ presluhi
- ❑ „Half duplex“



❑ Serijske povezave odpravljajo te slabosti in :

- ❑ Zaradi prostorske učinkovitosti omogočajo:
 - ❑ Fleksibilno povečevanje zmogljivosti : več povezav za bolj zmogljive naprave
 - ❑ Diferencialni prenos

Throughput ^{[1][ii]}				
×1	×2	×4	×8	×16



Sinhronizacija pri hitrih serijskih povezavah

► Pri večini serijskih prenosov:

- se urin signal ne prenaša od oddajnika k sprejemniku,
- se na sprejemni strani restavrira iz sprejetih podatkov („clock recovery“):
 - spremembe stanja v sprejetem signalu morajo biti dovolj pogoste

► Primer rešitve: Kodiranje 8b/10b

- se 8 bitov preslika v 10 bitov (256 kombinacij iz 1024)
 - s tem se **omeji nesorazmerje med številom enic in ničel** v signalu in tako zagotovi enosmerno uravnoteženje signala (DC- balance)
 - **omeji se število enakih bitov** (ni spremembe nivoja) v signalu – največ pet zaporednih enic ali ničel.

► Uporaba:

- ☐ PCI Express,
- ☐ SATA,
- ☐ Firewire,
- ☐ Gigabit ETH,
- ☐ DVI,HDMI

PCI Express link performance^{[45][46]}

Version	Introduced	Line code		Transfer rate per lane ^{[i][ii]}	Throughput ^{[i][iii]}				
					×1	×2	×4	×8	×16
1.0	2003	NRZ	8b/10b	2.5 GT/s	0.250 GB/s	0.500 GB/s	1.000 GB/s	2.000 GB/s	4.000 GB/s
2.0	2007		8b/10b	5.0 GT/s	0.500 GB/s	1.000 GB/s	2.000 GB/s	4.000 GB/s	8.000 GB/s
3.0	2010		128b/130b	8.0 GT/s	0.985 GB/s	1.969 GB/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s
4.0	2017		128b/130b	16.0 GT/s	1.969 GB/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s	31.508 GB/s
5.0	2019	PAM-4 FEC	128b/130b	32.0 GT/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s	31.508 GB/s	63.015 GB/s
6.0	2022		242B/256B FLIT	64.0 GT/s 32.0 GBd	7.563 GB/s	15.125 GB/s	30.250 GB/s	60.500 GB/s	121.000 GB/s

Primerjava paralelnih in serijskih povezav

Primerjava povezav ob enaki kapaciteti 10Gb/s:

▶ Paralelna:

- ▶ **128-bitna** dvosmerna povezava (full-duplex) s **f=78MHz** ima:
 - ▶ kapaciteto **10Gb/s** (v eno smer) in
 - ▶ zasede **256 linij** na tiskanem vezju.

▶ Serijska:

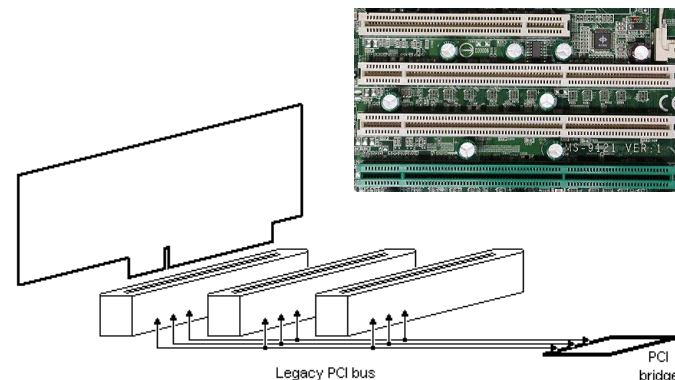
- ▶ **4 serijskimi kanali** s kapaciteto po 2,5Gb/s ($4 \times 2,5\text{Gb/s} = 10\text{Gb/s}$)
- ▶ zasedejo samo **16 linij** na tiskanem vezju.

Primer razvoja zmogljivih povezav (iz paralelnih v serijske):

Paralelna vodila (PCI, AGP) : ~ 1990 +

AGP and PCI: 32-bit buses operating at 66 and 33 MHz respectively

Specification	Voltage	Clock	Speed	Transfers/clock	Rate (MB/s)
PCI	3.3/5 V	33 MHz	—	1	133
PCI 2.1	3.3/5 V	33/66 MHz	—	1	133/266
AGP 1.0	3.3 V	66 MHz	1×	1	266
AGP 1.0	3.3 V	66 MHz	2×	2	533
AGP 2.0	1.5 V	66 MHz	4×	4	1066
AGP 3.0	0.8 V	66 MHz	8×	8	2133
AGP 3.5*	0.8 V	66 MHz	8×	8	2133

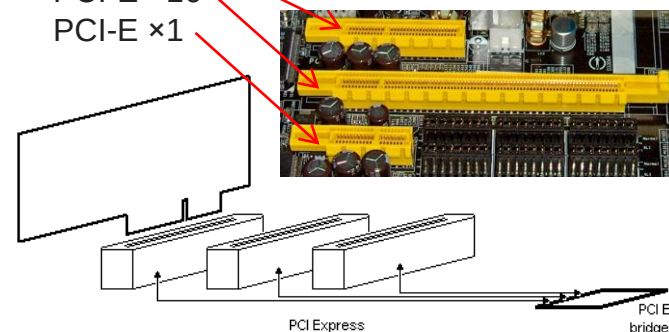


Hitre serijske povezave : ~ 2010 +: PCI Express (hitre serijske povezave)

PCI Express link performance^{[45][46]}

Version	Intro-duced	Line code		Transfer rate per lane ^[45]	Throughput ^{[45][46]}				
					×1	×2	×4	×8	×16
1.0	2003	NRZ	8b/10b	2.5 GT/s	0.250 GB/s	0.500 GB/s	1.000 GB/s	2.000 GB/s	4.000 GB/s
2.0	2007		8b/10b	5.0 GT/s	0.500 GB/s	1.000 GB/s	2.000 GB/s	4.000 GB/s	8.000 GB/s
3.0	2010		128b/130b	8.0 GT/s	0.985 GB/s	1.969 GB/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s
4.0	2017		128b/130b	16.0 GT/s	1.969 GB/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s	31.508 GB/s
5.0	2019		128b/130b	32.0 GT/s	3.938 GB/s	7.877 GB/s	15.754 GB/s	31.508 GB/s	63.015 GB/s
6.0	2022	PAM-4 FEC	242B/256B FLIT	64.0 GT/s 32.0 GBd	7.563 GB/s	15.125 GB/s	30.250 GB/s	60.500 GB/s	121.000 GB/s

PCI-E ×4
PCI-E ×16
PCI-E ×1

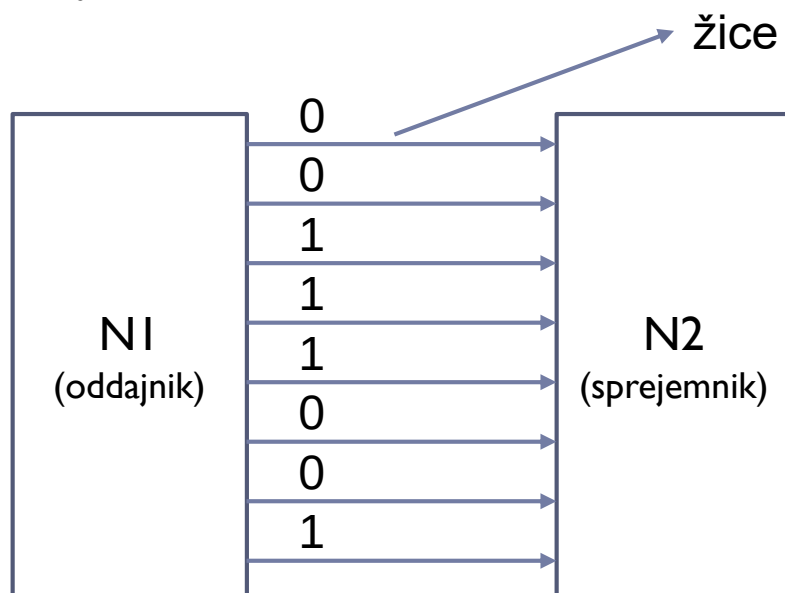


Naloge

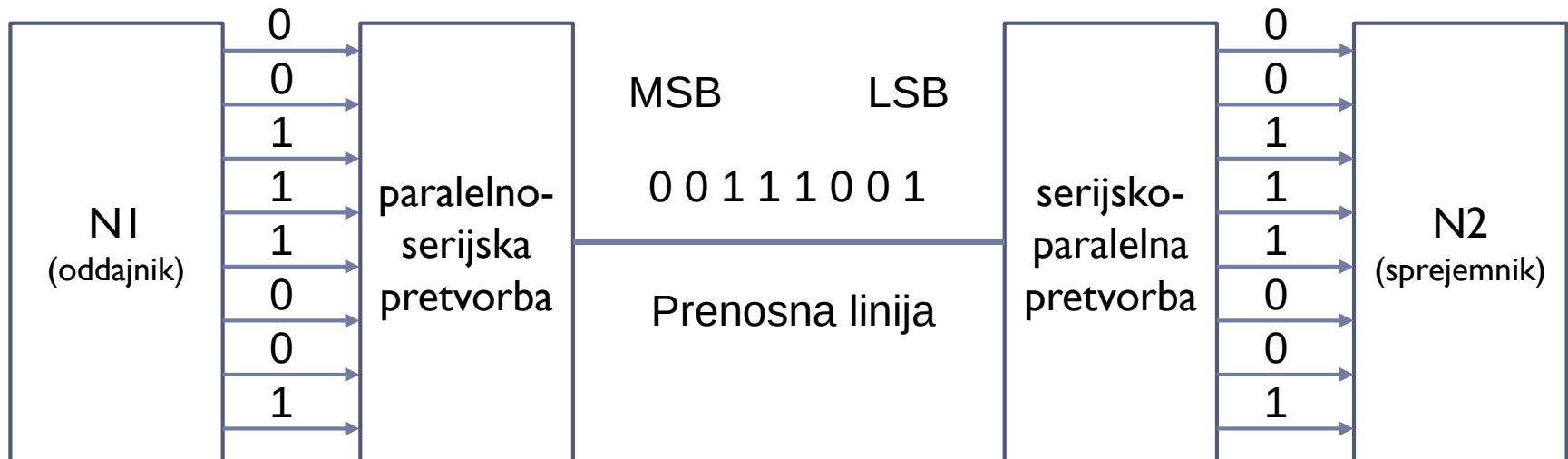
- Podani sta dve napravi, ki si izmenjujeta podatke. Naprava N1 oddaja podatke in naprava N2 sprejema podatke. Narišite izvedbo paralelnega in serijskega prenosa za 8-bitne znake. Shemo narišite tako, da v napravi vpišete tudi ali je uporabljen oddajnik (ang. transmitter) ali sprejemnik (ang. receiver), označite smer pošiljanja ter določite binarne vrednosti na posameznih linijah za številko 9 v ASCII kodi. Pri serijskem prenosu se najprej prenese najmanj pomemben bit (LSB – least significant bit).

Rešitev: $\text{ASCII}(9) = 39_{\text{hex}} = 57_{10} = 00111001_2$

Paralelni prenos



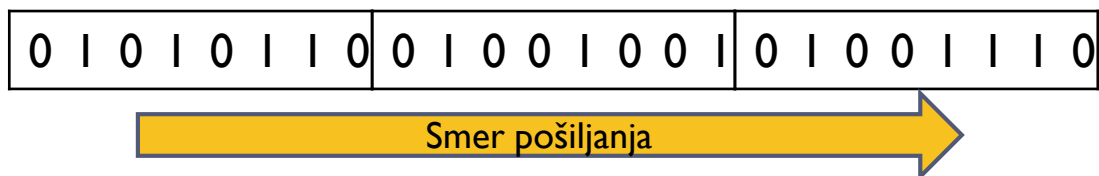
Serijski prenos



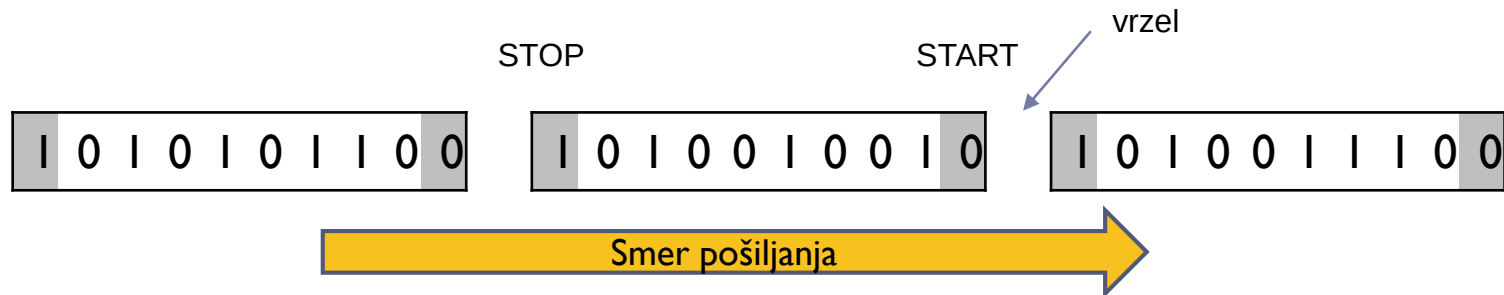
2. Naprava N1 pošilja podatke napravi N2. Napišite zaporedje podatkov za asinhronski in sinhronski serijski prenos 8-bitnih znakov v ASCII kodi. Označite smer pošiljanja bitov, ki poteka od leve proti desni. Niz znakov je enak VIN.

Rešitev: Za niz znakov VIN so kode ASCII v hex: 56 49 4E

- Sinhronski način

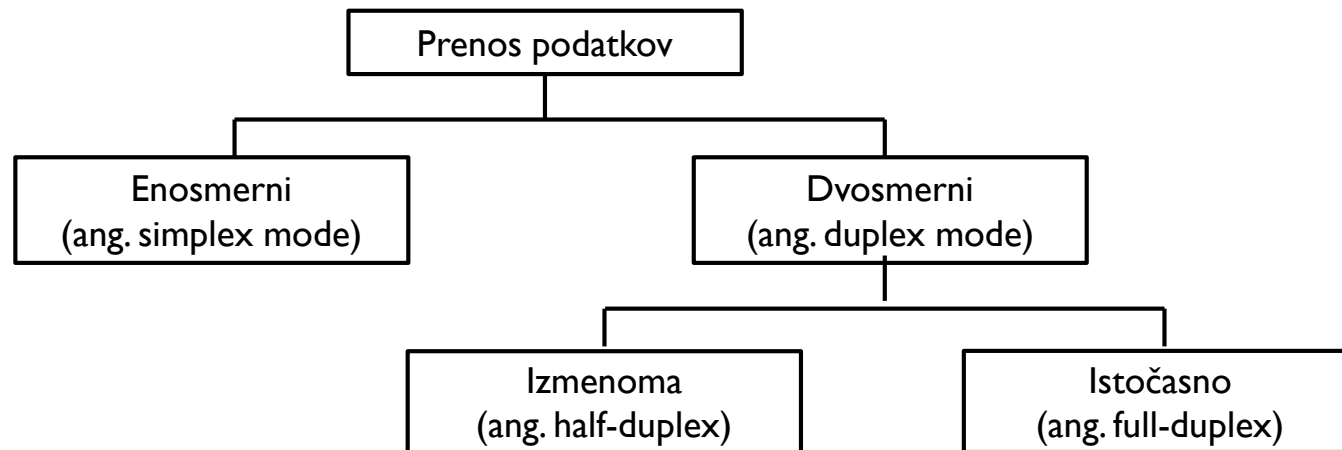


- Asinhronski način (dodana sta bita START in STOP)



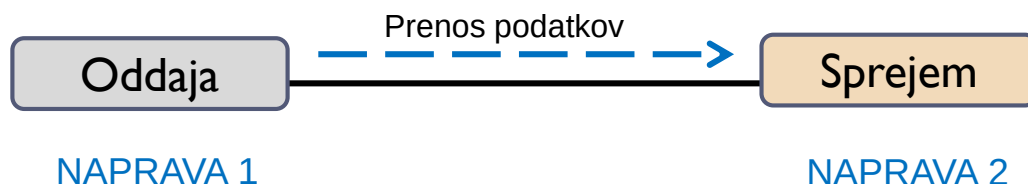
3 Način (smer) prenosa

- ❑ Način prenosa določa smer izmenjave informacij oz. smer potovanja podatkov
- ❑ Poznamo tri načine:



3.1 Enosmerni prenos (ang. simplex)

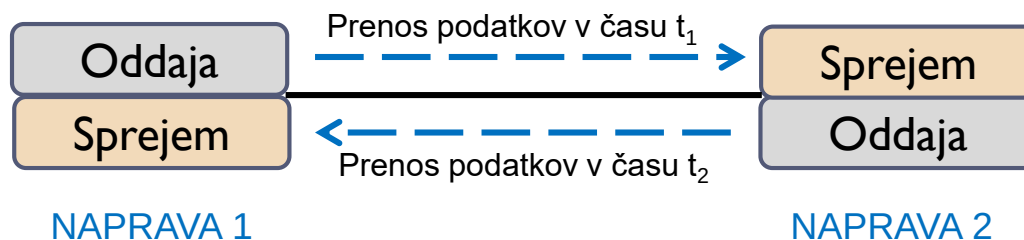
- ❑ Napravi sta povezani z eno linijo.
- ❑ Prenos poteka samo v eno smer ena naprava oddaja (ang. transceiver), druga sprejema signal (ang. receiver).



- ❑ Primeri uporabe:
 - tipkovnica, miška, skener → računalnik
 - računalnik → zaslon, tiskalnik

3.2 Dvosmerni izmenični prenos (ang. half duplex).

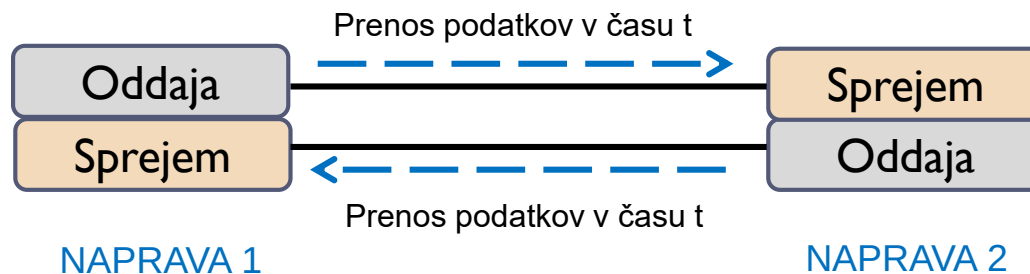
- Napravi sta povezani z eno linijo.



- Prenos je možen v obe smeri, vendar ne hkrati (ko ena naprava pošilja podatke, jih druga sprejema in obratno).
- Običajno sta v napravah oddajnik in sprejemnik skupaj v čipu (ang. transceiver)
- Primeri uporabe:
 - “Walkie-talkie“
 - Internetni brskalniki

3.3 Dvosmerni istočasni prenos (ang. full duplex).

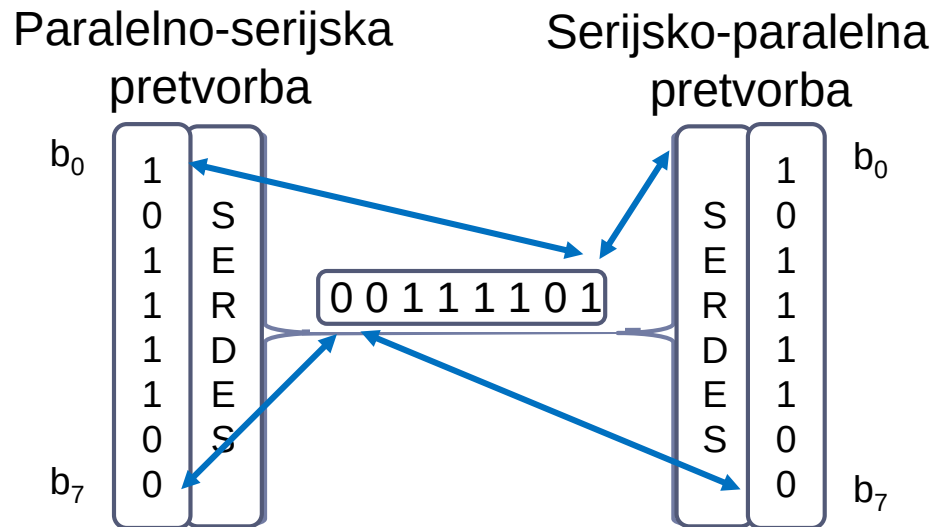
- ❑ Napravi sta povezani z dvema linijama.



- ❑ Prenos je možen hkrati v obe smeri.
- ❑ Obe napravi lahko istočasno pošiljata in sprejemata podatke.
- ❑ Primer uporabe:
 - telefonsko omrežje

4 Izvedba serijskega prenosa podatkov (SERDES)

- ❑ V procesorju in V/I napravah so podatki vedno shranjeni in dostopni z določenim številom bitov (8, 16, 32, ...)
- ❑ Za serijski prenos je potrebno zagotoviti pretvorbo
 - paralelne oblike v serijsko pri oddaji in
 - serijske oblike v paralelno pri sprejemu.
- ❑ Naprave za pretvorbo: SERDES – SERializer – DESerializer
- ❑ Primer za prenos 8-bitnega podatka.

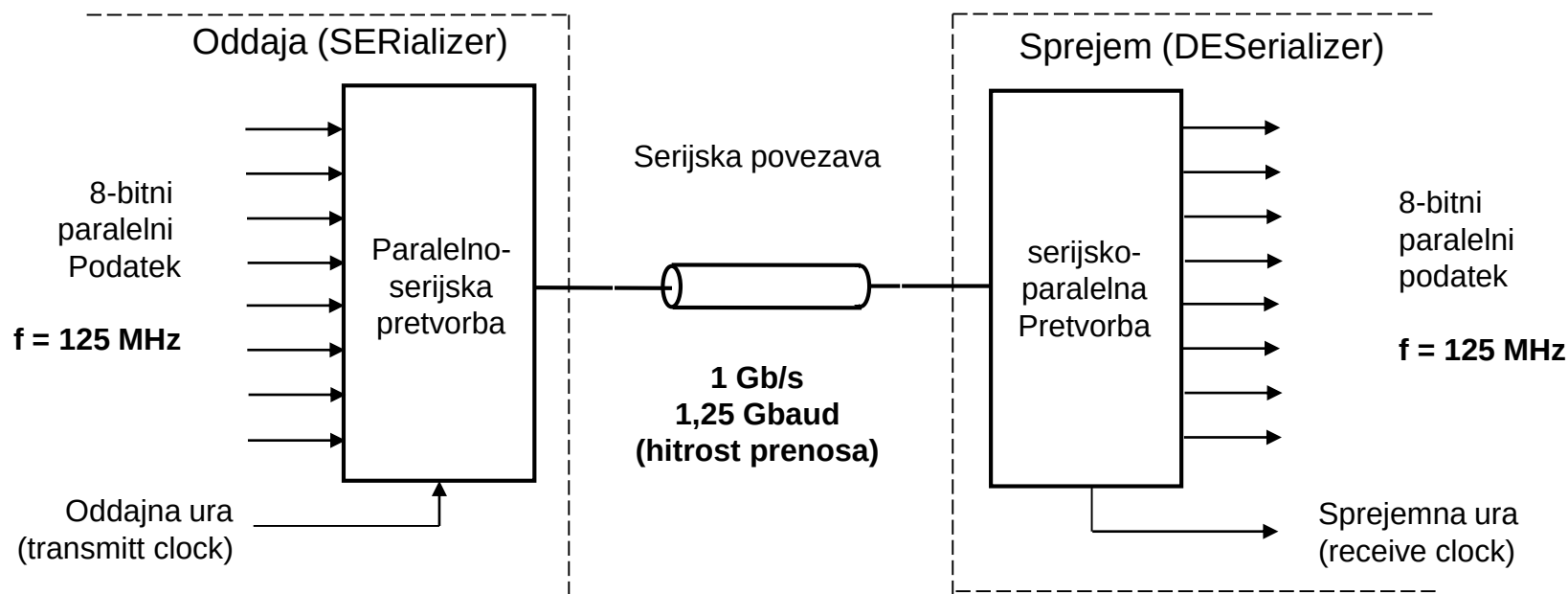


❑ Naprave SERDES

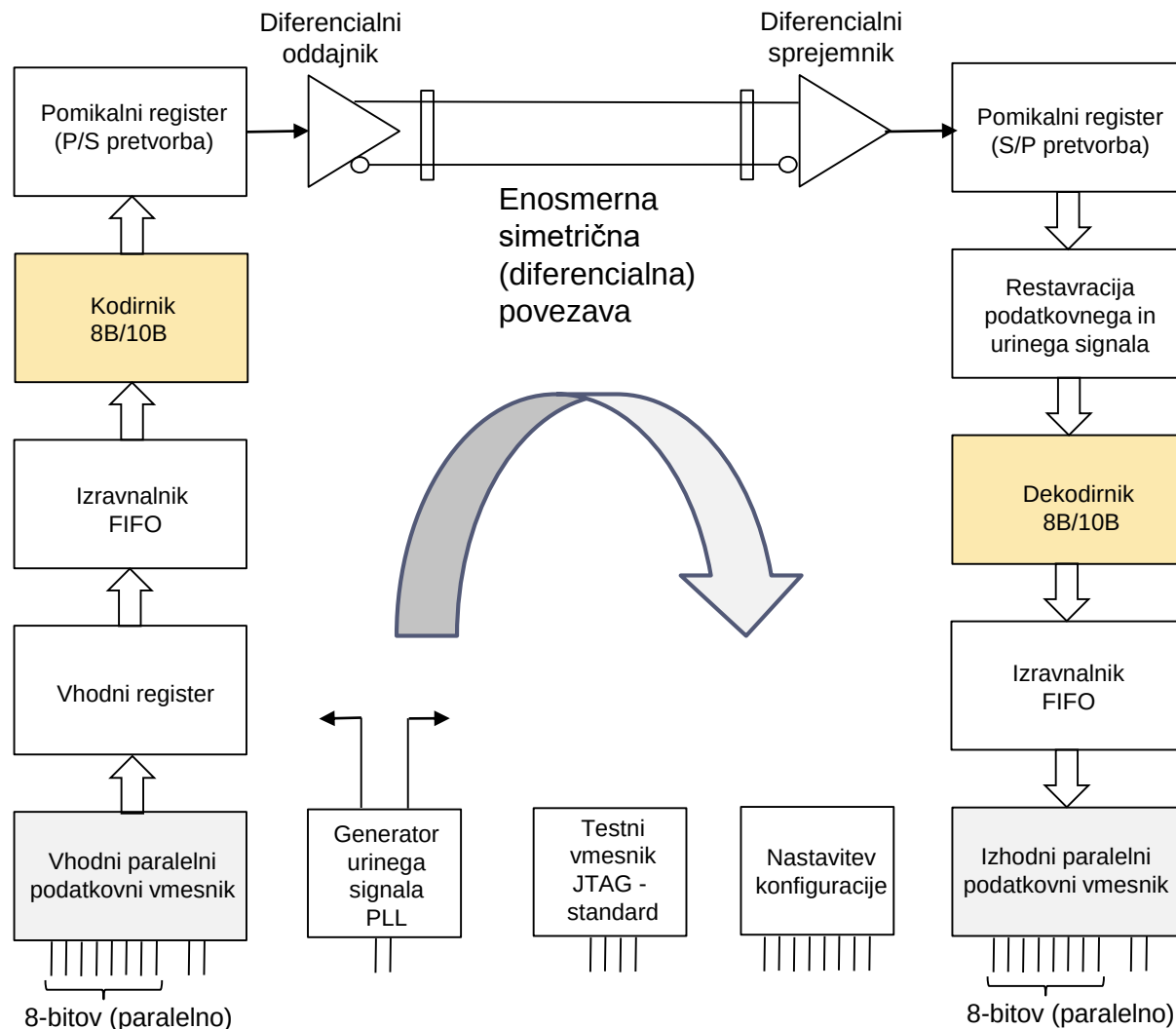
- SER – SERializer (prejme paralelne podatke in jih pretvori v zaporedni niz bitov)
- DES – DESerializer (prejme zaporedni niz bitov in ga pretvori v paralelne podatke)

❑ Uporaba: telekomunikacije, video, industrija

❑ Primer: Serijski prenos 8- bitnega podatka



■ SERDES - funkcijski diagram



5 Hitrost prenosa podatkov

- Hitrost prenosa podatkov je pri serijskem načinu podana kot

BITNA HITROST (ang. bit rate) - **C**

- količina podatkovnih elementov (bitov), ki se prenesejo v eni sekundi.
- izraža se v bitih na sekundo [$\text{biti/s} = \text{b/s} = \text{bps}$]

Podatkovni element (ang. data element) ali **bit** je najmanjša količina, ki predstavlja del informacije.

- Pogosto se uporablja tudi

BAUDNA HITROST (ang. baud rate) - **BR**

- količina signalnih elementov, ki se prenesejo v eni sekundi.
- izraža se v signalnih elementih na sekundo [baud]

Signalni element (ang. signal element) prenaša podatkovne elemente in lahko vsebuje enega ali več bitov.

- BITNA in BAUDNA hitrost nista enaki, podobnost obstaja pod določenimi pogoji.
- Vir: <https://techdifferences.com/difference-between-bit-rate-and-baud-rate.html#KeyDifferences>
https://www.youtube.com/watch?v=8wm0QIbVW9cQ&ab_channel=MrBrownCS

5.1 Baudna hitrost

- ❑ Baudna hitrost (BR) je predvsem odvisna od pasovne širine B (ang. bandwidth) prenosne poti oz. prenosnega kanala.
 - **Nyquistov zakon** (iz leta 1928): Teoretično je največje število signalnih elementov na sekundo [baud], ki jih lahko pošljemo po prenosni poti, enako dvakratni pasovni širini v Hz.

$$BR \leq 2 B; \quad B = f_{\max} - f_{\min} \text{ [Hz]}$$

Običajno se uporablja $BR = B$ zaradi zamikov in popačenj v resničnem kanalu.

- *Primer:* Analogni telefonski kanal prenaša frekvence od 300 [Hz] do 3400 [Hz]. Kolikšna je teoretična največja baudna hitrost?

$$B = f_{\max} - f_{\min} = 3400 \text{ [Hz]} - 300 \text{ [Hz]} = 3100 \text{ [Hz]}$$

$$BR = 2 B = 6200 \text{ [baudov]} = 6200 \text{ signalnih elementov}$$

Emile Baudot (1845 – 1903), francoski inženir, eden pionirjev telekomunikacij. Po njem se imenuje enota baud. Izumitelj prvega načina digitalne komunikacije → Baudotov kod.

Izumitelj telegrafa, kjer se je uporabljal njegov kod in je omogočal več prenosov po eni liniji.

Harry Nyquist (1889 – 1976) rojen na Švedskem, leta 1907 emigriral v ZDA, inženir elektronike, doktoriral na univerzi Yale, leta 1917. Pomembni so njegovi prispevki k teoriji komunikacij: Nyquistov kriterij stabilnosti; Nyquistova frekvenca; Nyquist-Shannonov teorem o vzorčenju.

5.2 Bitna hitrost

❑ Odvisna je od

- pasovne širine kanala (B) in
- motenj, šuma na prenosni poti v obliki razmerja signala proti šumu (SNR).

❑ **Shannonov zakon (1948)** določa najvišjo teoretično bitno hitrost C [bit/s]:

$$C[b/s] \leq B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = \mathbf{B \cdot 3.322 \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)}, \text{ kjer so:}$$

B - pasovna širina kanala [Hz]

S - moč signala [W]

N - moč šuma [W]

$\frac{S}{N}[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$ - razmerje signala proti šumu v decibelih

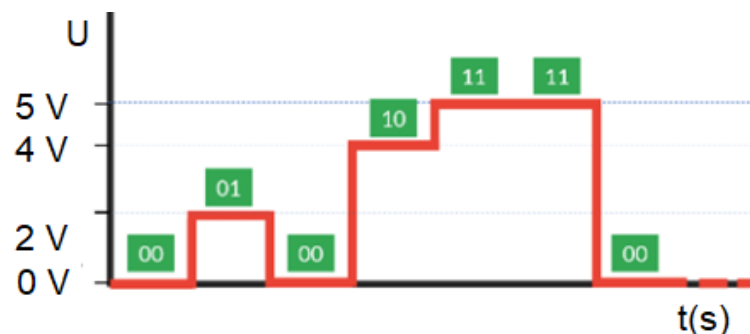
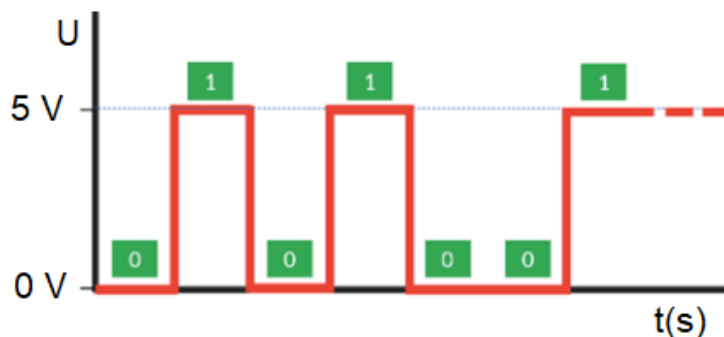
$$\frac{S}{N} = 10^{\frac{S}{N}[dB]/10}$$

$$\log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 3.322 \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Claude Shannon (1916 – 2001) rojen v Michiganu, diplomiral iz elektrotehnike in matematike, doktoriral na MIT 1940. Pomembni prispevki: Matematična teorija komunikacij; Teorija informacij; Nyquist-Shannonov teorem o vzorčenju.

Primeri

- ❑ Primer 1: Signalni element ima $N = 2$ napetosti (0 V, 5 V)
v enem signalnem elementu se prenese en bit (bitna hitrost = baudna hitrost).
- ❑ Primer 2: Signalni element ima 4 napetosti (0 V, 2 V, 4 V, 5 V)
v enem signalnem elementu se preneseta dva bita (bitna hitrost = 2 x baudna hitrost).



- ❑ BITNA in BAUDNA hitrost glede na število bitov, ki jih prenaša signalni element.

1 bit	→	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	$C = BR$
2 bita	→	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	$C = 2 BR$
3 biti	→	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	$C = 3 BR$
4 biti	→	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	$C = 4 BR$

Primer: akustični („dial-up“) modemi

BaudRate vs BitRate

Connection	Modulation	Bit rate [kbit/s]	Year released
110 baud Bell 101 modem	FSK	0.1	1958
300 baud (Bell 103 or V.21)	FSK	0.3	1962
1200 bit/s (1200 baud) (Bell 202)	FSK	1.2	1976
1200 bit/s (600 baud) (Bell 212A or V.22)	QPSK	1.2	1980 ^{[27][28]}
2000 bit/s (1000 baud) (Bell 201A)	PSK	2.0	1962
2400 bit/s (600 baud) (V.22bis)	QAM	2.4	1984 ^[27]
2400 bit/s (1200 baud) (V.26bis)	PSK	2.4	
4800 bit/s (1600 baud) (V.27ter)	PSK	4.8	^[29]
4800 bit/s (1600 baud, Bell 208B)	DPSK	4.8	
9600 bit/s (2400 baud) (V.32)	QAM	9.6	1984 ^[27]
14.4 kbit/s (2400 baud) (V.32bis)	trellis	14.4	1991 ^[27]
19.2 kbit/s (2400 baud) (V.32 "terbo")	trellis	19.2	1993 ^[27]
28.8 kbit/s (3200 baud) (V.34)	trellis	28.8	1994 ^[27]
33.6 kbit/s (3429 baud) (V.34)	trellis	33.6	1996 ^[30]
56 kbit/s (8000/3429 baud) (V.90)	digital	56.0/33.6	1998 ^[27]
56 kbit/s (8000/8000 baud) (V.92)	digital	56.0/48.0	2000 ^[27]

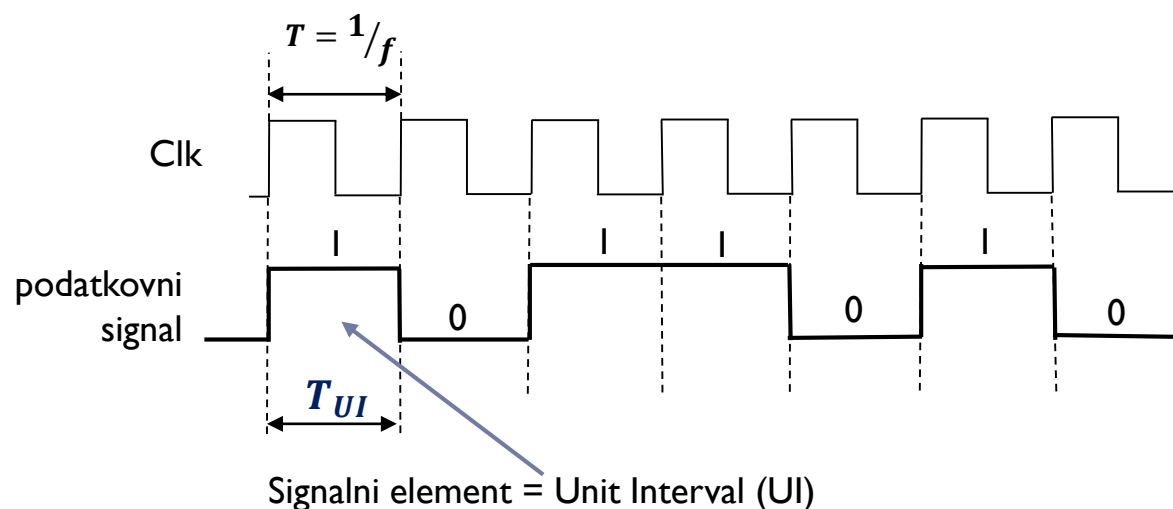
Primer od prej: Analogni telefonski kanal prenaša frekvence od 300 [Hz] do 3400 [Hz]. Kolikšna je teoretična največja baudna hitrost?

$$\begin{aligned}
 B &= f_{max} - f_{min} \\
 &= 3400 \text{ [Hz]} - 300 \text{ [Hz]} \\
 &= 3100 \text{ [Hz]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 BR &= 2 B = 6200 \text{ [baudov]} = \\
 &6200 \text{ sign.el.}
 \end{aligned}$$

Čas trajanja signalnega elementa

- ❑ Signalni element imenujemo tudi sprememba signala ali tudi Unit interval (UI)
- ❑ Podan imamo časovni diagram za podatkovni signal in urin signal (Clk).

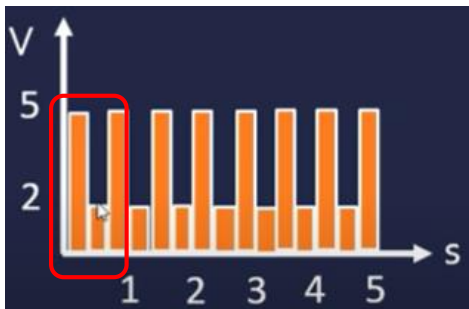


- ❑ Kako je določen čas trajanja signalnega elementa T_{UI} v povezavi z urinim signalom?
 - frekvenca ure: f - [Hz] in je
 - perioda: $T = 1/f$ [s]
- čas trajanja signalnega elementa je običajno enak eni urini periodi:

$$T_{UI} = T$$

Naloge

1. Analogni signal omogoča prenos 2 bitov v enem signalnem elementu. Kakšna je bitna hitrost, če je mogoče prenašati 2000 signalnih elementov v sekundi?
 - Rešitev: baud hitrost: $BR = 2000 \text{ [baud/s]}$,
 št. bitov v signalnem elementu: $N = 2 \text{ [bit/ baud]}$
 bitna hitrost: $C = BR * N = 2000 * 2 = 4000 \text{ b/s}$
2. Analogni signal ima bitno hitrost 8000 bitov na sekundo in baudno hitrost 2000 baudov. Koliko bitov se prenese v enem signalnem elementu?
 - Rešitev: baudna hitrost: $BR = 2000 \text{ [baud/s]}$,
 bitna hitrost: $C = 8000 \text{ b/s}$
 št. bitov v signalnem elementu: $N = C / BR \text{ [bit/ baud]}$
3. Kakšna je baudna hitrost (BR) za podan časovni diagram?



$BR = 3 \text{ [baud]}$, ker so 3 signalni elementi v 1 sekundi

4. Na analognem telefonskem kanalu s pasovno širino $B=3100$ [Hz] je razmerje signala proti šumu enako 32 [dB]. Kolikšna je teoretična maksimalna bitna hitrost na tem kanalu?

Izračun:

enačba za bitno hitrost je: $C[b/s] = B \cdot 3.322 \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)$

poznamo razmerje moči signal-šum $\frac{S}{N} [dB] = 32 [dB]$

iz enačbe za $\frac{S}{N} [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{S [W]}{N [W]} \right)$ bomo izračunali $\frac{S [W]}{N [W]}$

$$\log_{10} \left(\frac{S [W]}{N [W]} \right) = \frac{\frac{S}{N} [dB]}{10} = \frac{32 [dB]}{10} = 3.2$$

iz dobljenega rezultata $\log_{10} \left(\frac{S [W]}{N [W]} \right) = 3.2$

izračunamo razmerje $\frac{S [W]}{N [W]} = 10^{3.2} \cong 1584$

ker je razmerje $\frac{S[W]}{N[W]} > 1000$,

lahko v enačbi za bitno hitrost $C [b/s] = B \cdot 3.322 \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)$

pri $\left(1 + \frac{S}{N} \right)$ zanemarimo 1 in uporabimo za izračun

$$\log_{10} \left(1 + \frac{S[W]}{N[W]} \right) = \log_{10} \left(\frac{S[W]}{N[W]} \right) = 3.2$$

in dobimo teoretično maksimalno bitno hitrost:

$$C = 3100 \cdot 3.322 \cdot 3.2 = 32954 [b/s].$$