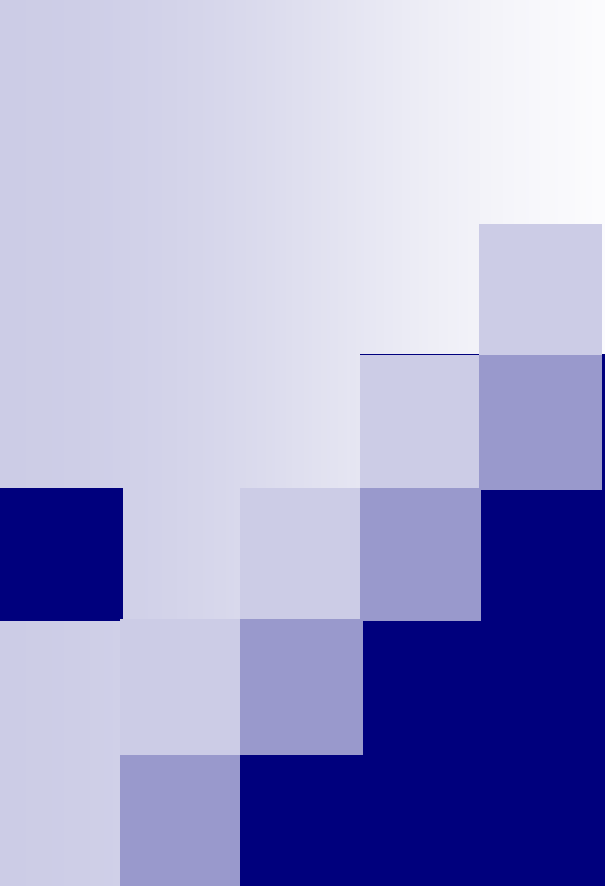




Vhodno-izhodne naprave (VIN)

Predavanja

3. Prenos podatkov

Robert Rozman

rozman@fri.uni-lj.si

Domača naloga DN/1 – Primeri tem

Podan je seznam naprav (vhodna, izhodna, vhodno/izhodna):

1. Tipkovnica (ang. keyboard)
2. Optična miška (angl. optic mouse)
3. Optični skener (ang. scanner)
4. Biometrični skener prstnih odtisov (ang. biometric fingerprint scanner)
5. Zaslon LCD (ang. liquid crystal display)
6. Zaslon na dotik (ang. touchscreen)
7. Projektor (ang. projector)
8. Brizgalni tiskalnik (ang. inkjet printer)
9. Laserski tiskalnik (ang. laser printer)
10. 3D tiskalnik (ang. 3D printer)
11. Bliskovni pomnilnik (ang. flash pomnilnik)
12. Zunanji pomnilnik HDD (ang. Hard Disk Drive)
13. Zunanji pomnilnik SSD (ang. Solid State Drive),
14. Čitalnik črtne kode (ang. barcode reader)
15. Čitalnik RFID (ang. RFID reader)
16. Spletna kamera (ang. webcam)
17. Mikrofon (angl. microphone)
18. Zvočnik (angl. speaker)

Novosti 2023

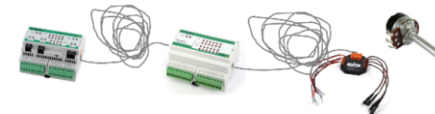
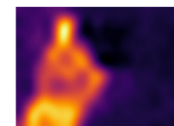
19. SensorTile.box (<https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-m-ksbox1v1.html>)
20. Napredna tipala z UI (npr. LSM6DSOX https://www.st.com/content/st_com/en/products/mems-and-sensors/inemo-inertial-modules/lsm6dsiox.html)
21. GPS sprejemniki (navigacija, pozicioniranje)
22. MEMS Tipala: pospeškometer, žiroskop, kompas in kombinacije
23. Logični (protokolski) analizatorji (npr. CAN, I2C, ...)
24. STM32: zajem, razpoznavanje, procesiranje zvoka
25. ADC in DAC pretvorniki
26. Aktivno dušenje hrupa (»Active noise cancellation«)
27. Merjenje kakovosti zraka (delci, plini, ...)
28. Matrično IR tipalo (primer: MLX906XX – Smarteh)
29. LIDAR
30. Detektorji gibanja (PIR, UZ, ...)

Novosti 2024

31. Smarteh LPC-PLC krmilnik (avtomatizacija) (<https://www.smarteh.com/si/produkti/produkti-za-avtomatizacijo-zgradb/lpc-2-programirjivi-krmilniki/glavni-krmilni-moduli/>)
32. Cybrotech Integra avtomatizacija – VIN-LAB vaja (<https://cybrotech.com/products/>)
33. BT Lokatorji (npr. Airtag, Chipolo)
34. Pametne (športne) ure in tipala (<https://racunalniske-novice.com/kako-delujejo-pametne-ure-in-njihovi-senzorji/>)
35. Tehnologija in naše telo (npr. <https://racunalniske-novice.com/prvi-pacient-s-cipom-v-mozganih-lahko-premika-racunalnisko-misko/>)
36. Temo predlagam po emailu (npr. vlažnost tal, tipalo bližine, IR, prstni odtis, ...)

Novosti 2026

36. Merjenje kakovosti zraka (CO2, VOC, PM delci, ...)
37. Pametna hiša
38. Komunikacijske tehnologije za krajše povezave (npr. CANBUS, I2C, SPI, U(S)ART)
39. Termo kamera in zaznavanje
40. Brežžične komunikacijske tehnologije lokalnega dosega (npr. Zigbee, ZWave, Bluetooth, BLE, Matter)
41. Ideje za VIN projekte, izzivi – OneNote zvezek:
 - a. LAPSy Embedded Academy zvezek (Spletni pogled)
42. Temo predlagam po emailu (npr. vlažnost tal, tipalo bližine, IR, prstni odtis, ...)



DN1: Domača naloga – Primeri tem

OneNote zvezek:

LAPSY Embedded Academy zvezek ▾
_Knjižnica vsebine

Projekt-Delo Vsebine-TODO VIN Projekt - Ideje • VIN Projekti - Done •

Brezstično zaznavanje - CapSense

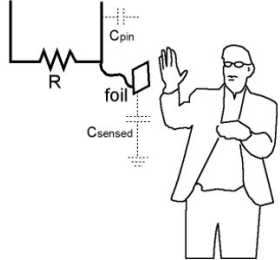
nedelja, 24. april 2022 11:28

Capacitive Sensing Library
by Paul Badger

...

How it works

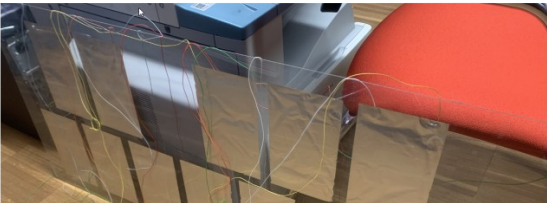
Send pin Receive pin



The capacitiveSensor method toggles a microcontroller send pin to a new state and then waits for the receive pin to change to the same state as the send pin. A variable is incremented inside a while loop to time the receive pin's state change. The method then reports the variable's value, which is in arbitrary units.
[Watch a short video demonstration](#) (YouTube)

From <<https://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor/>>

Elektrode na pleksi panelu - kot glasbena klavirura



VIN Projekti - Done •

- Moduli, Tipala •
- STM32 •
- LAB Oprema •
- Docs •
- Cube IDE
- Elektronika

ToF sensors) •

Termo kamera - LIR tipalo Smarteh
Smarteh PLC

Brezstično zaznavanje - CapSense

- ToF tipala in Theremin •
- Make Your Own Simple Theremin
- Theremin - brezstični glasbeni instrument
- Let's Design and Build a STM32 Theremin!
- Emerging applications of time-of-flight technol...
- Logični/protokolski analizator
- Sigrok - SW
- I2c sniffer •
- Red Pitaya
- Praktični izzivi v LAPSYLAB
- LSM6DSOX (30 kosov na voljo)
- DIY hodeči robot
- Breadboard samogradnja
- Gibanje
- Joystick
- DIY osciloskop STM32

DN1: Domača naloga – Primeri tem

ST Sensors – prezentacija (ideje, primeri tipal, metod, ...)

- ST MEMS Sensor at a glance
- ST Sensors - general overview
- ST sensors usage

- Motion MEMS Sensors
- Environmental Sensors

• Consumer MEMS

- Accelerometer / 6-axis IMU
- Pressure, Microphone & Temperature Sensors
- Other Products (Magnetometer, High-g, Audio AXL)

• Industrial MEMS

- Other Product (AXL for Medical)

• Automotive MEMS

ST Sensors

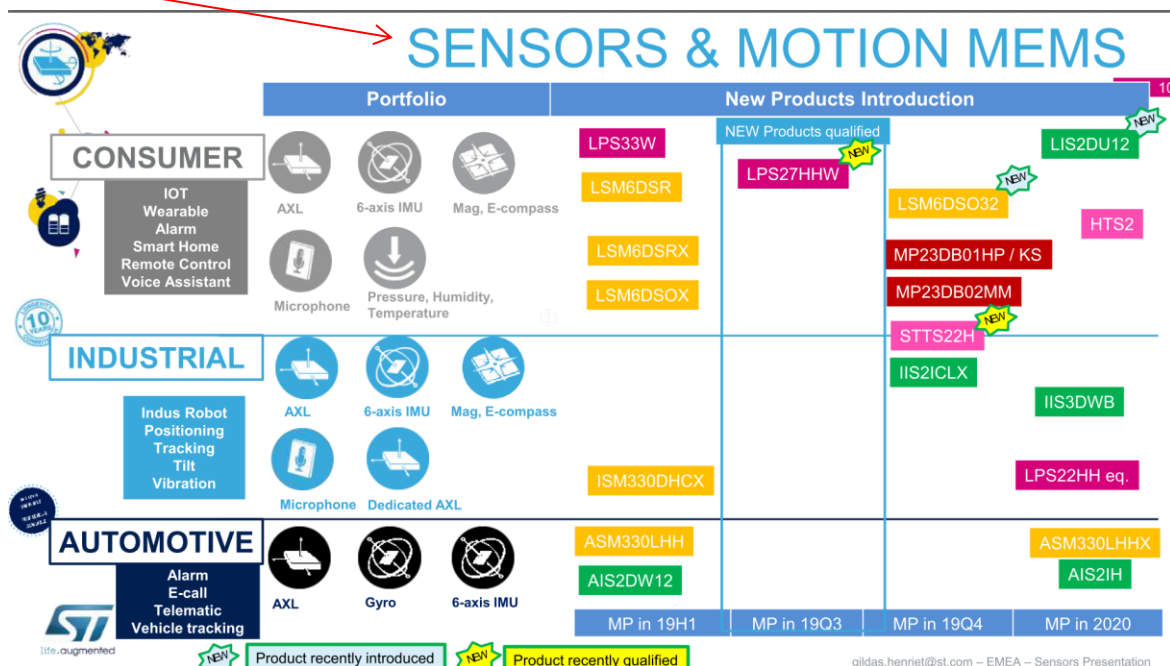
October 2019

Product Marketing Team EMEA

VIN-DN1 Domača naloga 1 (V/I naprave)

VIN-DN1 Domača naloga 1 (V/I naprave) - Opis tem

"ST Sensors" - prezentacija tipal (pomoč pri izbiri, idejah)



DN1: Domača naloga – Primeri idej

ST Sensors – prezentacija (ideje, primeri tipal, metod, ...)

Sensing

- Electrical sensing
- Environmental sensing
- Image sensing
- Motion sensing
- Presence sensing
- Proximity / ranging sensing
- Sound sensing

[Overview](#) **Documentation**

Senses enable human beings to interact with the world and sensors help extend the reach and scope of application of these interactions. From capturing images, measuring distances and monitoring environmental conditions (pressure, humidity and temperature) to detecting motion and sound, a physical variable is a key part of any electronic system and there's virtually no equipment that does not rely on sensors... [Read more](#)

Explore Sensing applications

Electrical sensing

Environmental sensing

Image sensing

Motion sensing

Presence sensing

Proximity / ranging sensing

Sound sensing

[See All ▶](#)

Featured Videos



Advanced 3D navigation with sensors

Teseo Draw merges GNSS signals with sensors data

[▶ Watch the video \(2:32\)](#)

<https://www.st.com/en/applications/sensing.html>

3. Prenos podatkov

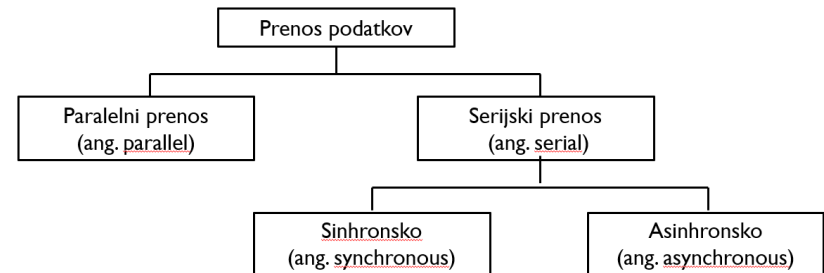
1. Paralelni prenos

2. Serijski prenos

2.1 Asinhronski prenos

2.2 Sinhronski prenos

Zmogljive serijske povezave (PCIExpress, ...)



3. Način (smer) prenosa

3.1 Enosmerni prenos (ang. simplex)

3.2 Dvosmerni izmenični prenos (ang. half duplex)

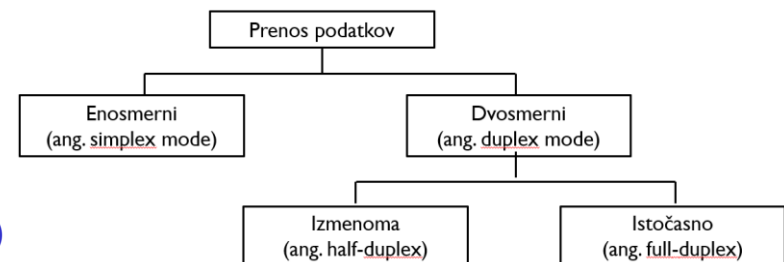
3.3 Dvosmerni istočasni prenos (ang. full duplex).

4. Izvedba serijskega prenosa podatkov (SERDES)

5. Hitrost prenosa podatkov

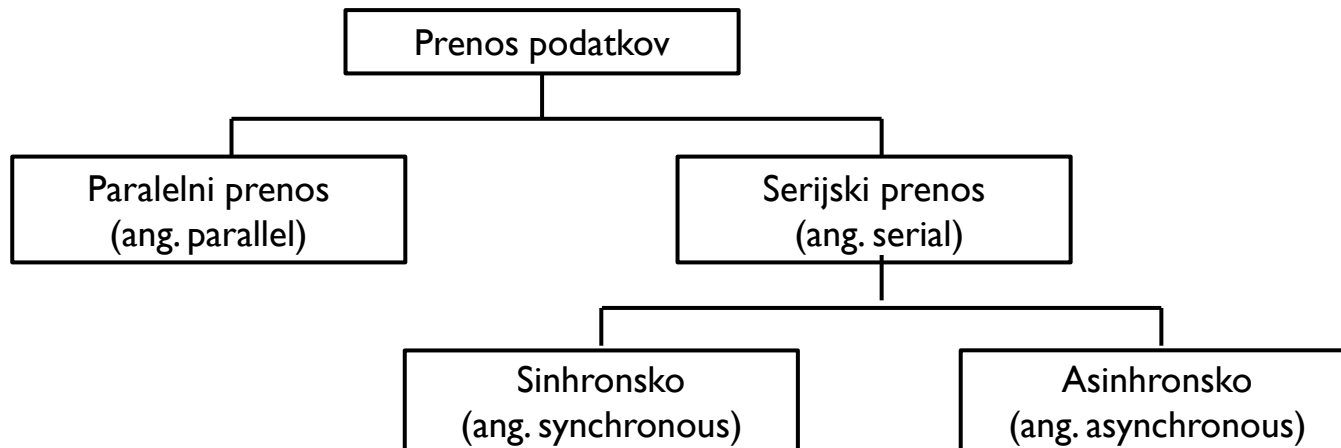
5.1 Baudna hitrost

5.2 Bitna hitrost



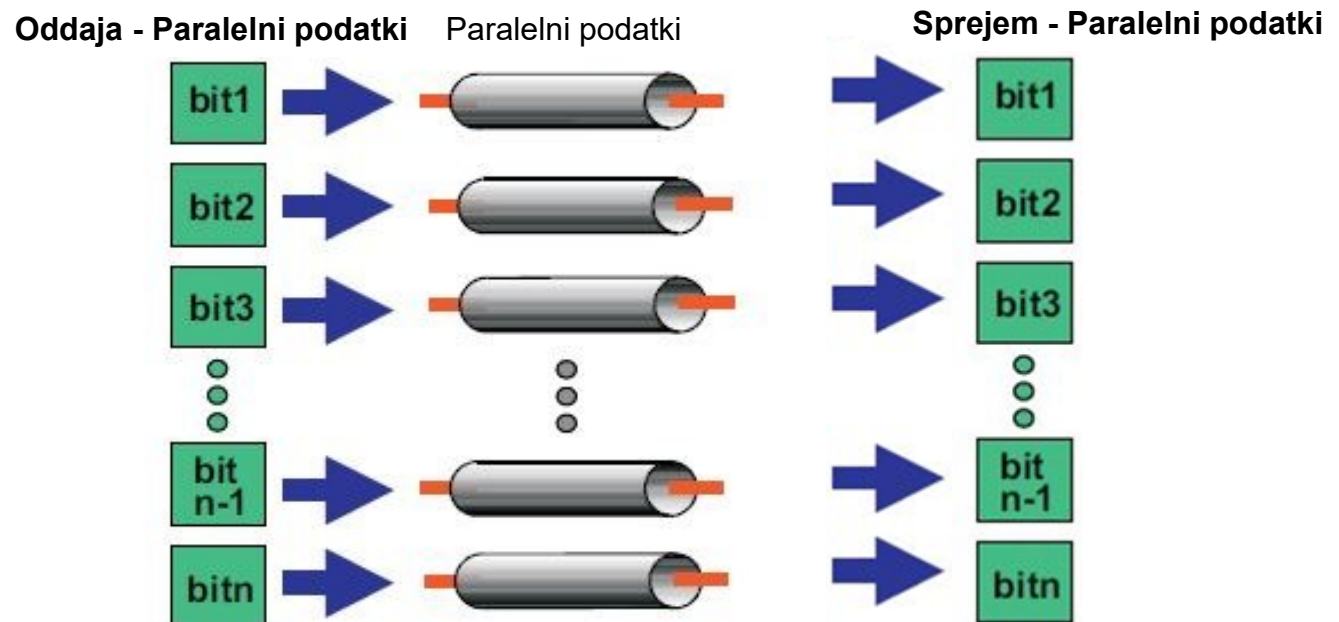
Prenos podatkov

□ Vrste prenosa podatkov



3.1 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.



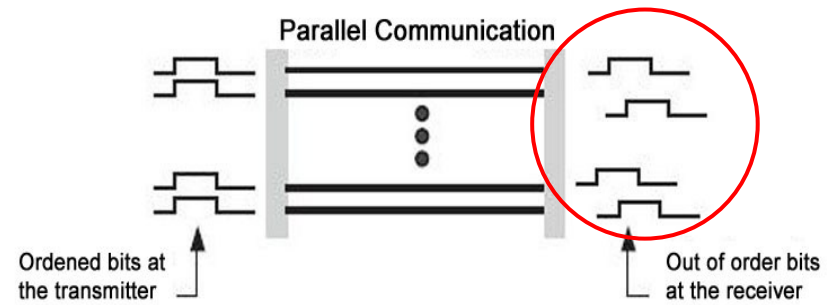
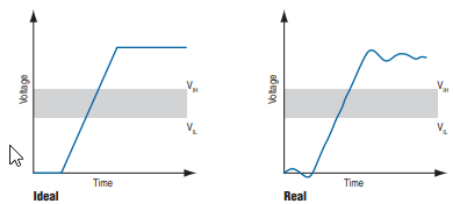


Figure 1–1. Ideal and Real Signal at the Receiver



❑ Prednosti

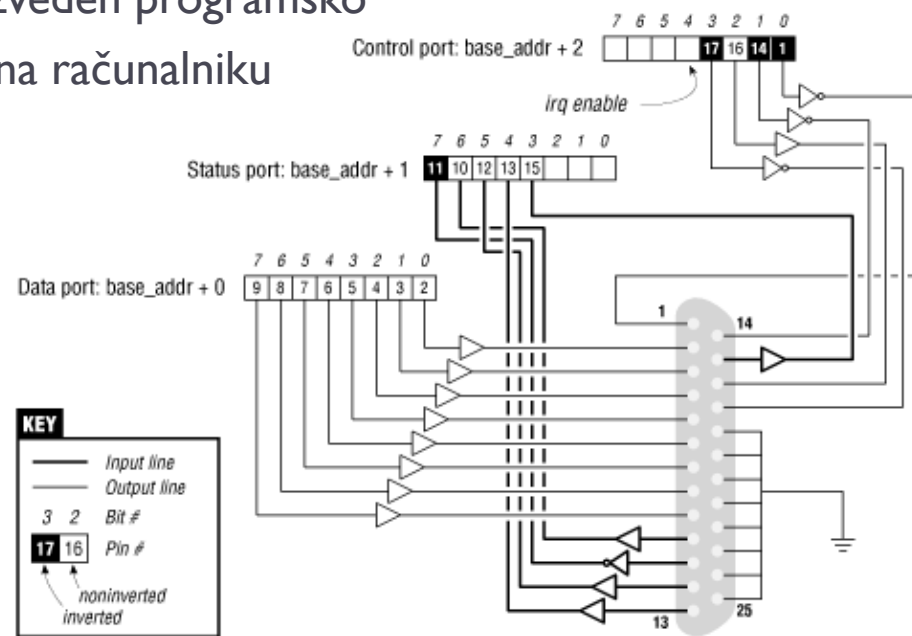
- Povečevanje hitrosti prenosa z večanjem širine povezave.
- Minimalna latenca (ang. latency) – minimalna zakasnitev od zahteve za podatke, do sprejema podatkov.
- Programski protokoli za paralelne vmesnike pogosto uporabljajo določene bite za nadzor prenosa in s tem omogočajo večje hitrosti prenosa.

❑ Slabosti

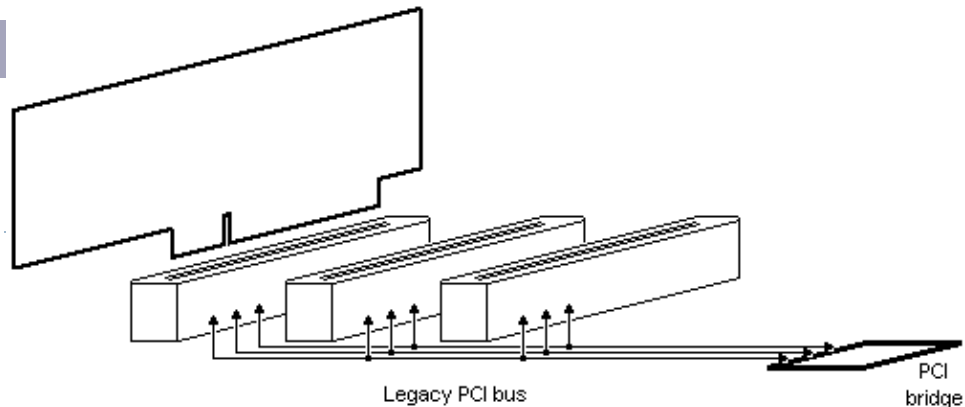
- Razdalje ne smejo biti prevelike zaradi medsebojnega vpliva paralelnih povezav (presluh, različne zakasnitve).
- Največja hitrost prenosa je omejena z razliko v času potovanja signalov po različnih poteh.
- Paralelne povezave zahtevajo več prostora na tiskanem vezju (več oddajnikov več sprejemnikov,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



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

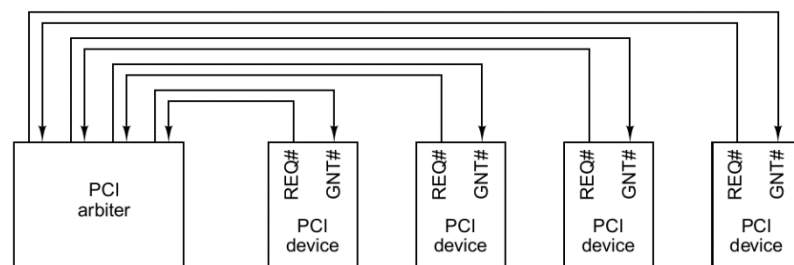
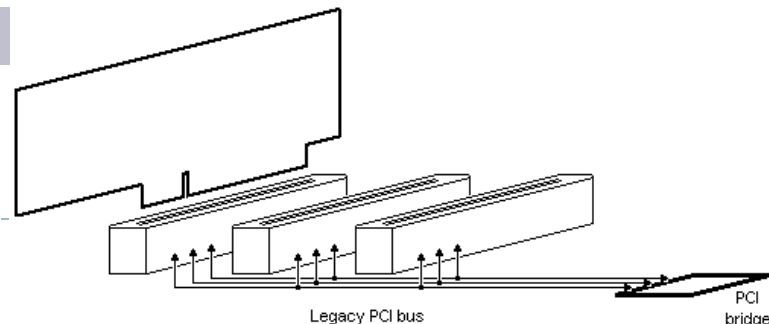
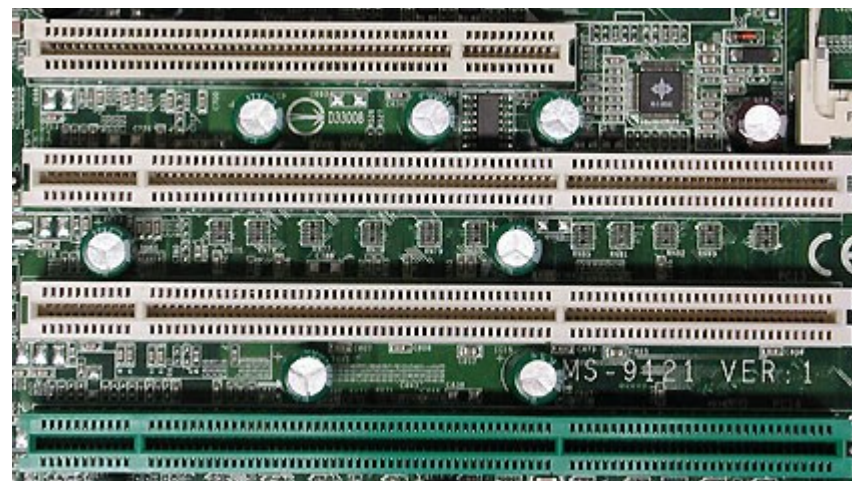
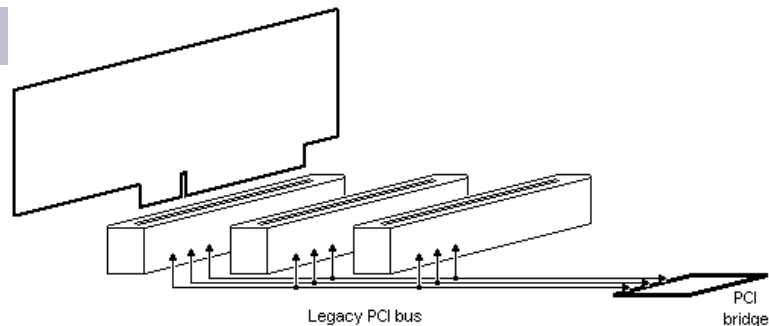


Figure 3-51. The PCI bus uses a centralized bus arbiter.

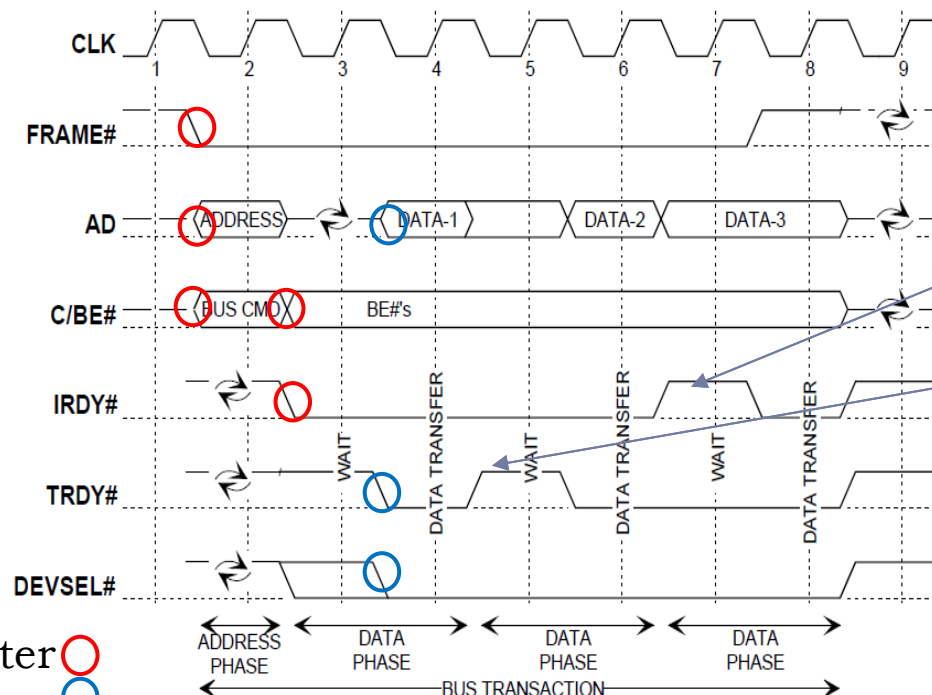


Primer paralelnega vodila: PCI - signali



„Master“ ni pripr.
Čakanje

„Slave“ ni pripr.
Čakanje



Master ○
Slave ○

Signal	Lines	Master	Slave	Description
CLK	1			Clock (33 MHz or 66 MHz)
AD	32	×	×	Multiplexed address and data lines
PAR	1	×		Address or data parity bit
C/BE	4	×		Bus command/bit map for bytes enabled
FRAME#	1	×		Indicates that AD and C/BE are asserted
IRDY#	1	×		Read: master will accept; write: data present
IDSEL	1	×		Select configuration space instead of memory
DEVSEL#	1		×	Slave has decoded its address and is listening
TRDY#	1		×	Read: data present; write: slave will accept
STOP#	1		×	Slave wants to stop transaction immediately
PERR#	1			Data parity error detected by receiver
SERR#	1			Address parity error or system error detected
REQ#	1			Bus arbitration: request for bus ownership
GNT#	1			Bus arbitration: grant of bus ownership
RST#	1			Reset the system and all devices

(a)

Sign	Lines	Master	Slave	Description
REQ64#	1	×		Request to run a 64-bit transaction
ACK64#	1		×	Permission is granted for a 64-bit transaction
AD	32	×		Additional 32 bits of address or data
PAR64	1	×		Parity for the extra 32 address/data bits
C/BE#	4	×		Additional 4 bits for byte enables
LOCK	1	×		Lock the bus to allow multiple transactions
SBO#	1			Hit on a remote cache (for a multiprocessor)
SDONE	1			Snooping done (for a multiprocessor)
INTx	4			Request an interrupt
JTAG	5			IEEE 1149.1 JTAG test signals
M66EN	1			Wired to power or ground (66 MHz or 33 MHz)

(b)

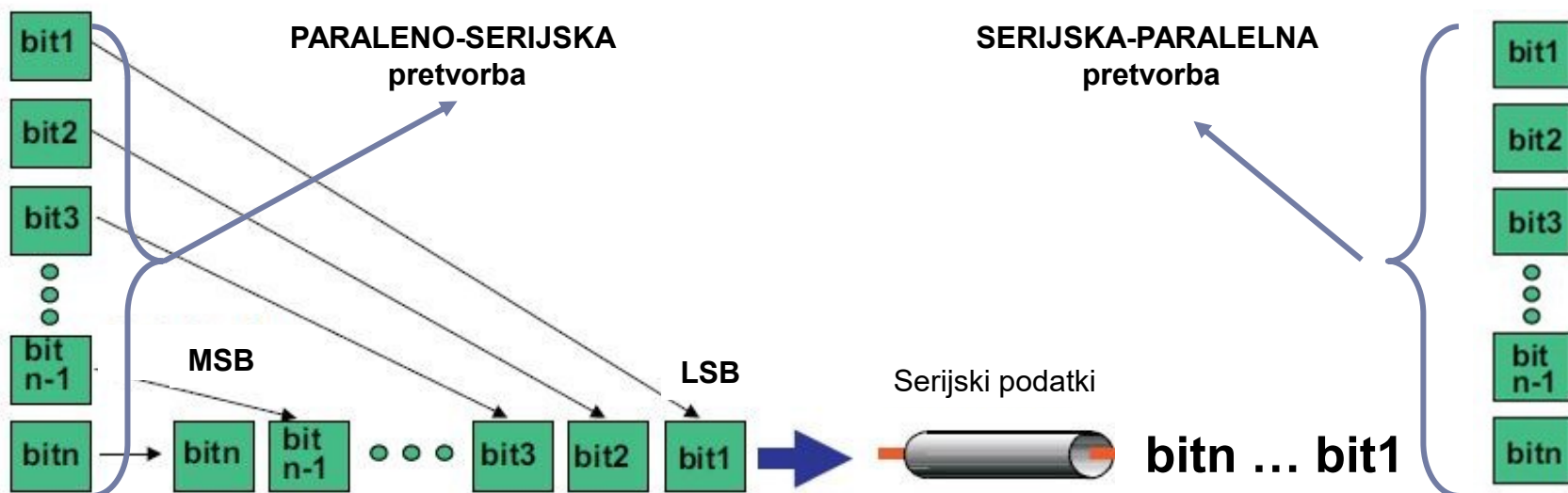
Figure 3-52. (a) Mandatory PCI bus signals. (b) Optional PCI bus signals.

3.2 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



3.2 Serijski prenos

□ Prednosti

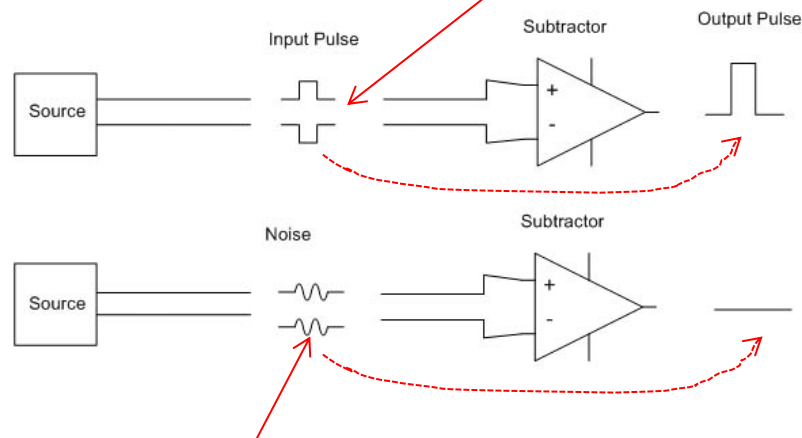
- Ni časovnega zamika med signali v povezavah (ang. time skew).
- Za prenos je potrebnih manj povezav (manj žic, cenejši kabli in konektorji).
- Povezave zasedejo manj prostora.
- Poraba energije na bit je manjša.

□ 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.

Diferencialni (simetrični) prenos – uporaben pri serijskih prenosih

- Prenos signala po **dveh vzporednih povezavah v simetrični („protifazni“) obliki**



□ Prednosti :

- **Manjša občutljivost na motnje** (odštevanje učinkov)
- **Manj EM motenj (EMI) v okolico** (odštevanje EM polj zaradi „protifaznosti“ in bližine)

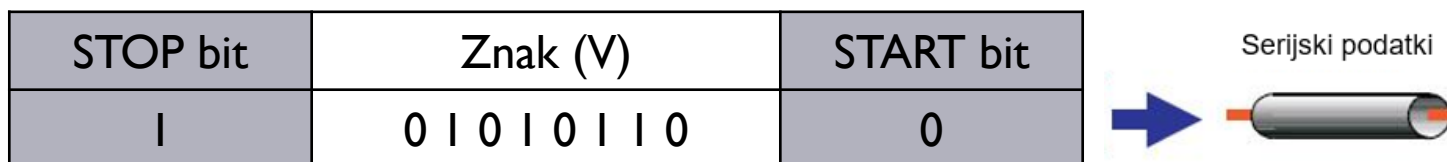
□ Slabosti :

- **Dodatna povezava**
 - serijske povezave imajo manj povezav, zato običajno to ni poseben problem

3.2 Serijski prenos

3.2.1 Asinhronski prenos (ang. asynchronous transmission):

- Običajno ni skupnega urinega signala (posebna povezava)
- Pošiljajo se krajše enote podatkov - primer UART:
 - Npr. UART samo en bajt (znak) naenkrat, ki je lahko črka abecede ali število ali krmilni znak
 - Sinhronizacija bitov med dvema napravama je omogočena z uporabo začetnega bita (START) in končnega bita (STOP).
 - Velikost enote za pošiljanje se iz 8 bitov poveča na 10 bitov.
 - Primer:



- 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 prebrati podatke.
 - sprejemnik je sinhroniziran z dohodnim bitnim tokom.
- Primer asinhronskih prenosov :
 - UART (npr. starejše tipkovnice, STM32H7) , CANBUS (STM32H7), ...

3.2 Serijski prenos

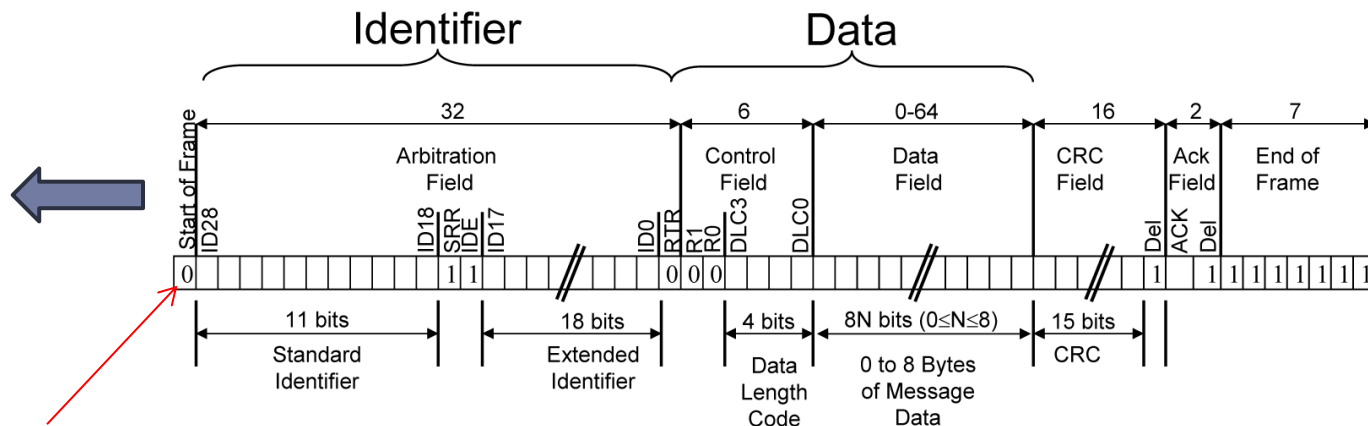
3.2.1 Asinhronski prenos (ang. asynchronous transmission):

- ▶ Primera :

- UART



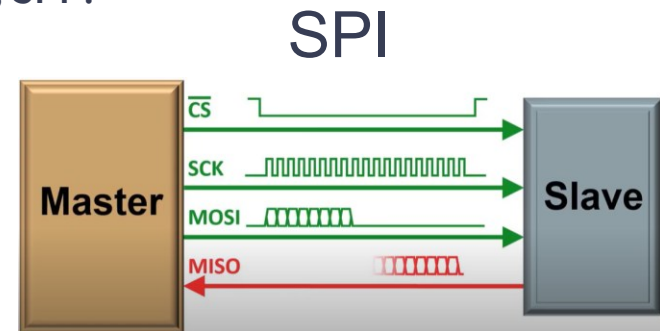
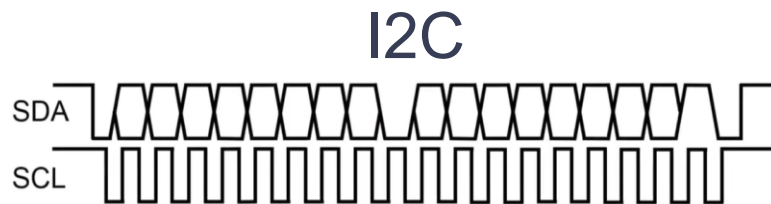
- CANBUS



3.2 Serijski prenos

3.2.2 Sinhronski prenos (ang. synchronous transmission):

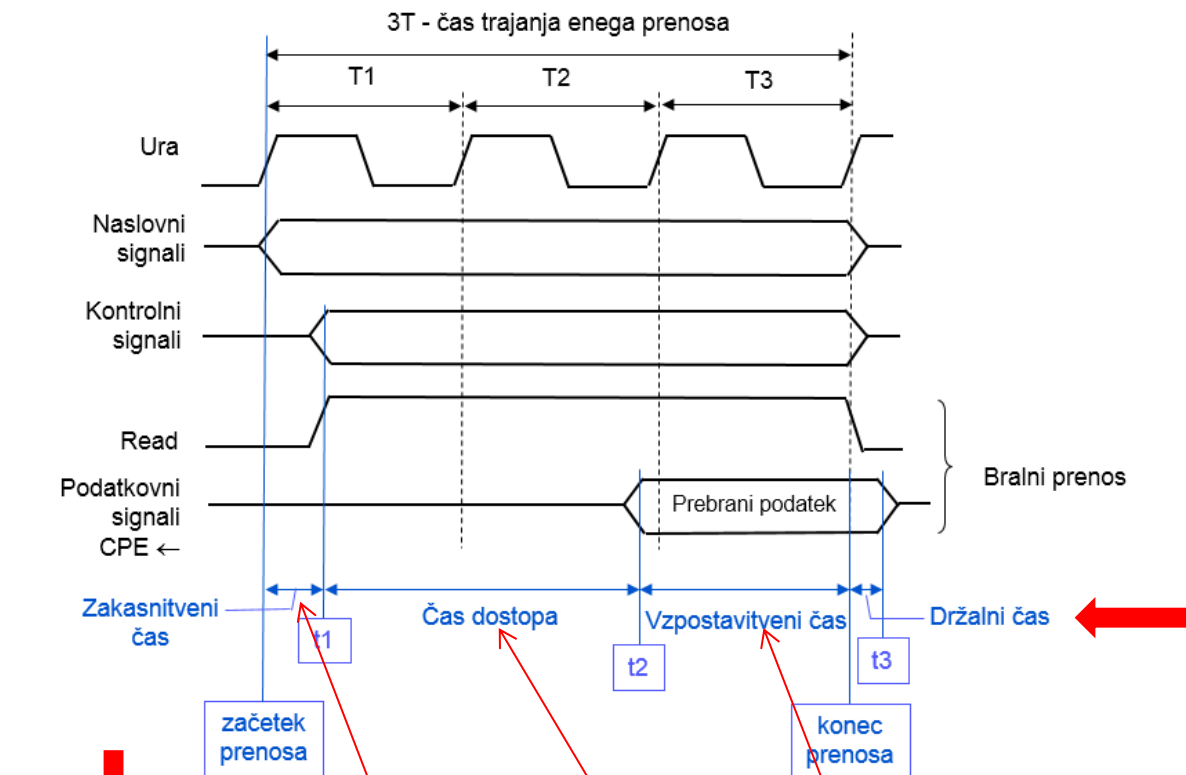
- Podatki se prenašajo v usklajenem pristopu v obliki delčkov, blokov ali okvirjev.
- Sinhronizacija je potrebna med oddajnikom in sprejemnikom – **skupni urin signal (povezava ali implicitno v podatk. signalu).**
- Primer: Serijski sinhronski komunikaciji I2C, SPI :



- Komunikacija med povezanimi napravami poteka v realnem času.
- Primeri sinhronskih prenosov:
 - SPI, I2C, USART
 - HDMI, SATA, ...

3.2.2 Sinhronski prenos (ang. synchronous transmission) – razvoj :

Časovni parametri pri prenosu



$$t_{potovanja} + t_{zakasnitev} + t_{dostopni} + t_{vzpostavitevni} \leq nT$$

$$t_{potovanja} = 2T = 2 / \delta$$

3.2.2 Sinhronski prenos (ang. synchronous transmission) – razvoj :

Časovni parametri pri prenosu

$$t_{\text{potovanja}} + t_{\text{zakasnitev}} + t_{\text{dostopni}} + t_{\text{vzpostavitevni}} \leq nT$$

$$t_{\text{potovanja}} = 2\tau = 2l / \delta$$

Primer: dolžina povezave 20cm:

$$2\tau = 2 * 0.2\text{m} * 7 \text{ ns/m} = 2.8 \text{ ns} \quad \rightarrow \quad 1/2.8\text{ns} = 357\text{MT/s} \text{ (idealni primer)}$$

$\approx 200 \text{ MT/s}$ (realno z upoštevanjem ostalih časov)

2007: pojav rač. z 2000MT/s – kako?

Krajše povezave ?

Drugi načini prenosa ?

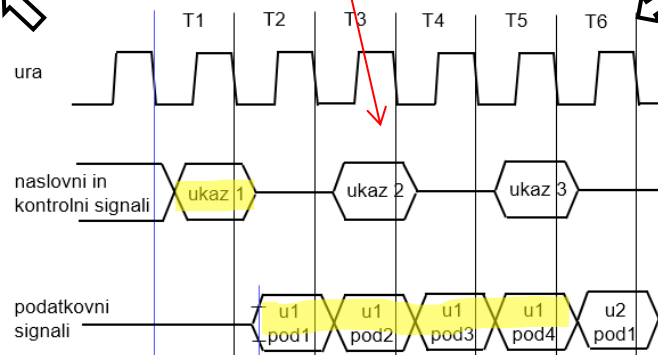
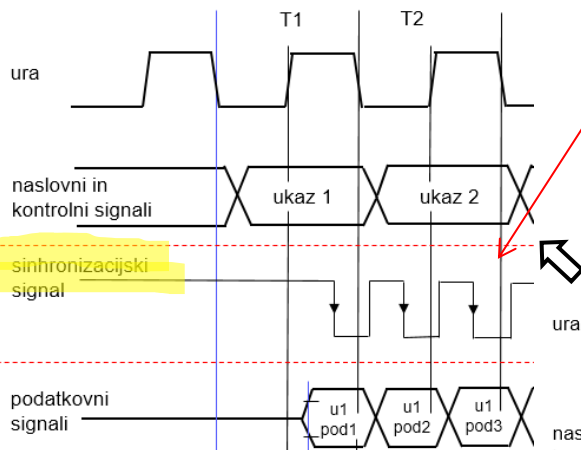
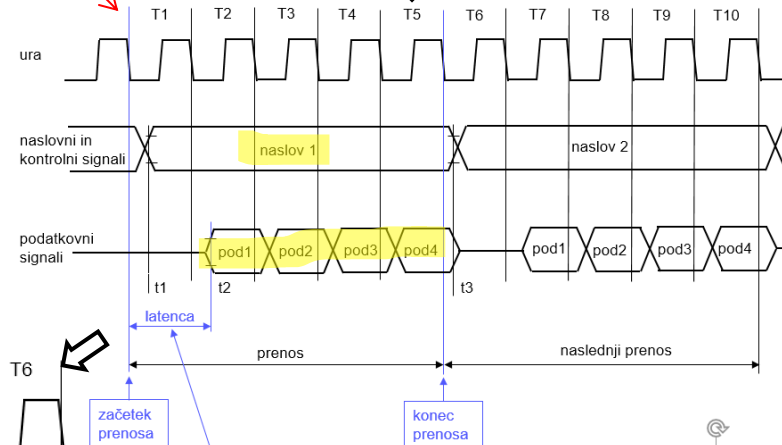
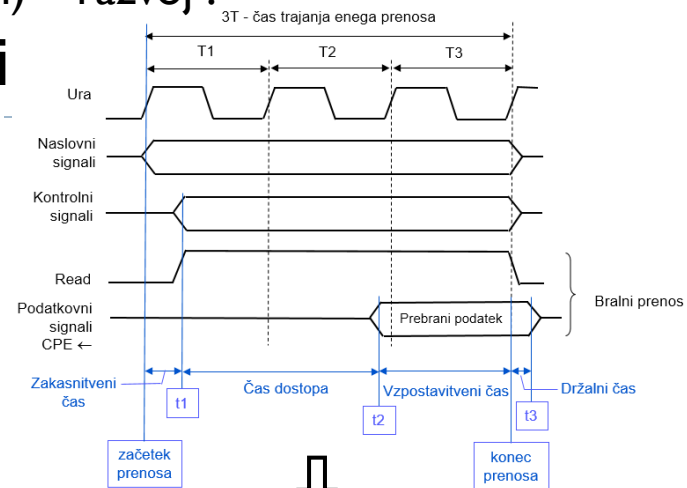
10x hitrejša tehnologija ?

3.2.2 Sinhronski prenos (ang. synchronous transmission) – razvoj :

Rešitev: eksplozijski in protokolski prenos

Osnovna ideja je zgostiti tok podatkov :

- ▶ zaporedni podatki -> eksplozijski prenos
- ▶ krajša začetna latenca -> protokolski prenos
- ▶ posebni urin signal -> izvorno sinhronski prenos
 - ▶ „sinhronizacijski signal“ – potuje s podatki !



3.2.2 Sinhronski prenos (ang. synchronous transmission) – razvoj :

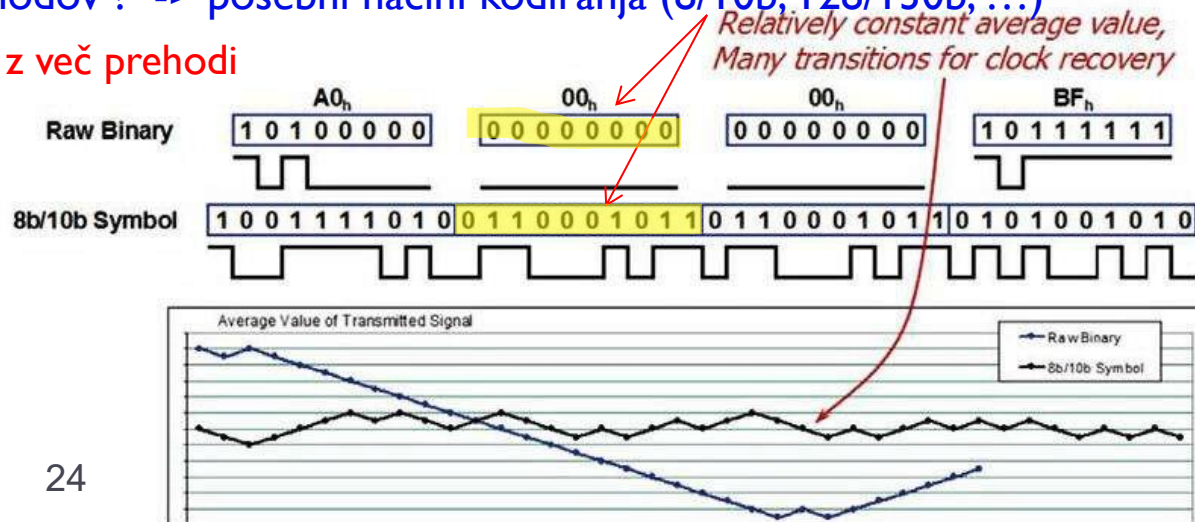
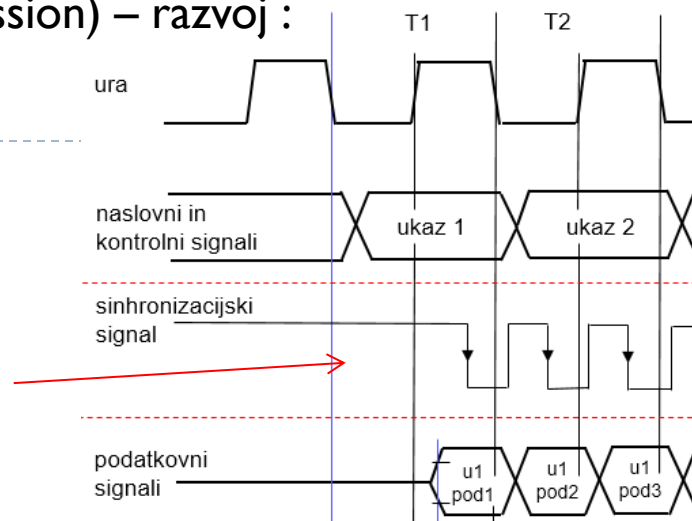
Nadaljnje pohitritve:

Osnovna ideja je zgostiti tok podatkov :

- ▶ eksplozijski, protokolski prenos ...
- ▶ **posebni urin signal** -> izvorno sinhronski prenos
 - ▶ deluje nekje do $f=2\text{GHz}$ ($t=0.5\text{ns}$), zato

Nadaljnja pohitritev :

- ▶ urin signal „vtisnemo“ v sam podatkovni signal:
 - ▶ SATA, PCIe, USB3, ...
 - ▶ Fronte podatkovnega signala -> „clock recovery“ sprejemnika
 - ▶ Kako do dovolj pogostih prehodov ? -> posebni načini kodiranja (8b/10b, 128b/130b, ...)
 - ▶ Uporabijo se **kodne besede z več prehodi**



Sinhronizacija pri hitrih serijskih povezavah

► Pri večini hitrih serijskih prenosov:

- se urin signal ne prenaša od oddajnika k sprejemniku,
- se na sprejemni strani urin signal restavrira („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)
 - omeji se razmerje med številom enic in ničel v signalu in tako zagotovi enosmerno uravnoteženje signala (DC- balance)
 - omeji se število enakih bitov

► Uporaba:

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

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

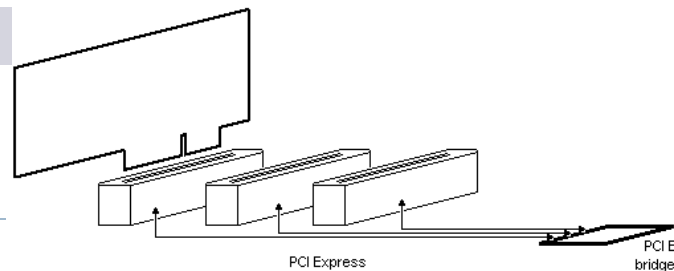
Version	Introduced	Line code		Transfer rate per lane ^{[i][ii]}	Throughput ^{[i][iii]}				
					×1	×2	×4	×8	×16
1.0	2003	NRZ	8b/10b	2.5 GT/s	0.250 GB/s	0.500 GB/s	1.000 GB/s	2.000 GB/s	4.000 GB/s
2.0	2007		8b/10b	5.0 GT/s	0.500 GB/s	1.000 GB/s	2.000 GB/s	4.000 GB/s	8.000 GB/s
3.0	2010		128b/130b	8.0 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

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 ^{[i][iv]}	Throughput ^{[ii][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 Gb/s	7.563 GB/s	15.125 GB/s	30.250 GB/s	60.500 GB/s	121.000 GB/s

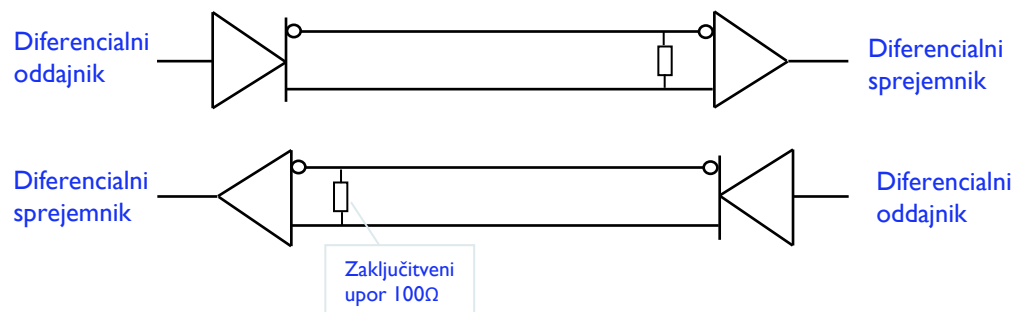
PCIe v1.x (f=2.5GHz):

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

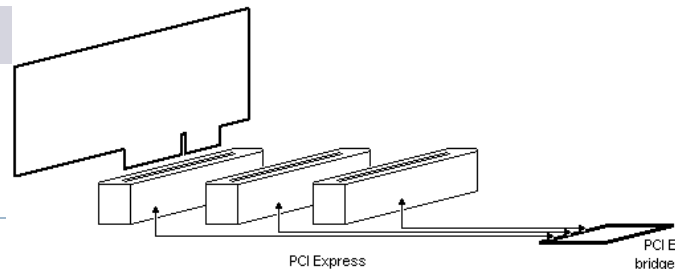
x1 povezava PCI Express (PCIe):

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

PCIe x1 enojna dvosmerna povezava - full-duplex

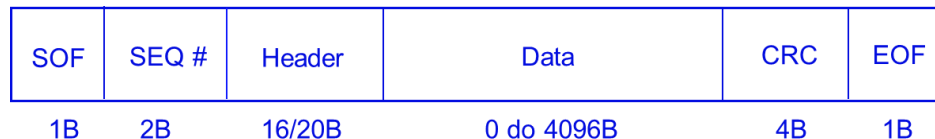


Primer hitre serijske povezave : PCI Express (P2P)



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

Programska
plast

Povezuje PCI Express sistem z operacijskim sistemom

Transportna
plast



Povezovalna
plast



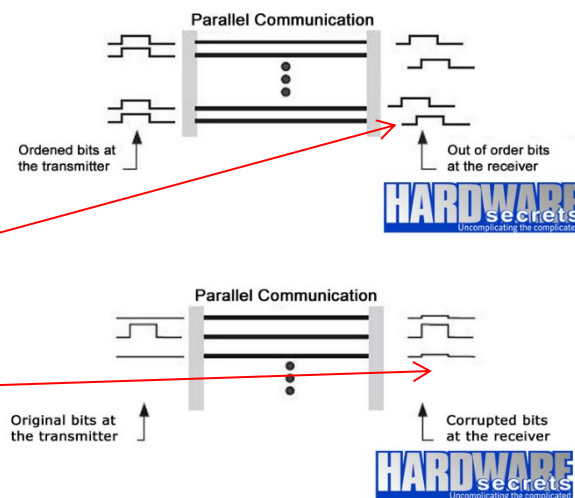
Fizična plast



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

❑ Slabosti paralelnih povezav v primerjavi s serijskimi:

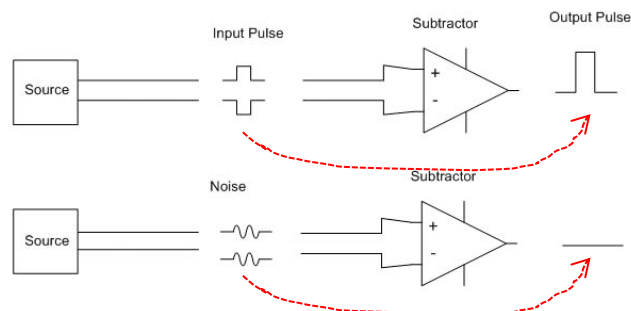
- ❑ veliko število povezav, več prostora, večji konektorji
 - ❑ diferencialni prenos bi še podvojil število povezav
- ❑ več elementov (oddajniki/sprejemniki), več porabe na bit
- ❑ omejena hitrost
 - ❑ različne zakasnitve (različna dolžina povezav)
 - ❑ odboji
 - ❑ presluhi
- ❑ „Half duplex“



❑ Serijske povezave odpravljajo te slabosti in :

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

Throughput ^{[1][4]}				
×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		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

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:

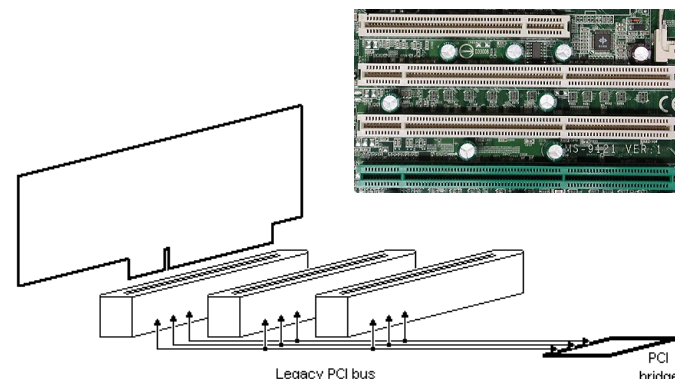
- ▶ **4 serijskimi kanali** s kapaciteto po 2,5Gb/s ($4 \times 2,5\text{Gb/s} = 10\text{Gb/s}$)
- ▶ zasedejo samo **16 linij** na tiskanem vezju.

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

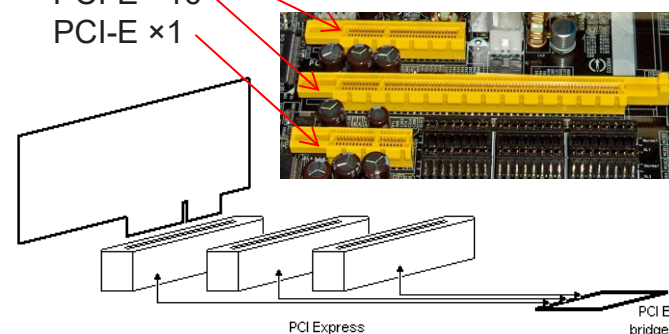


Hitre serijske povezave : ~ 2010 +: PCI Express (hitre serijske povezave)

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

Version	Intro-duced	Line code		Transfer rate per lane ^[47]	Throughput ^{[47][48]}				
					×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

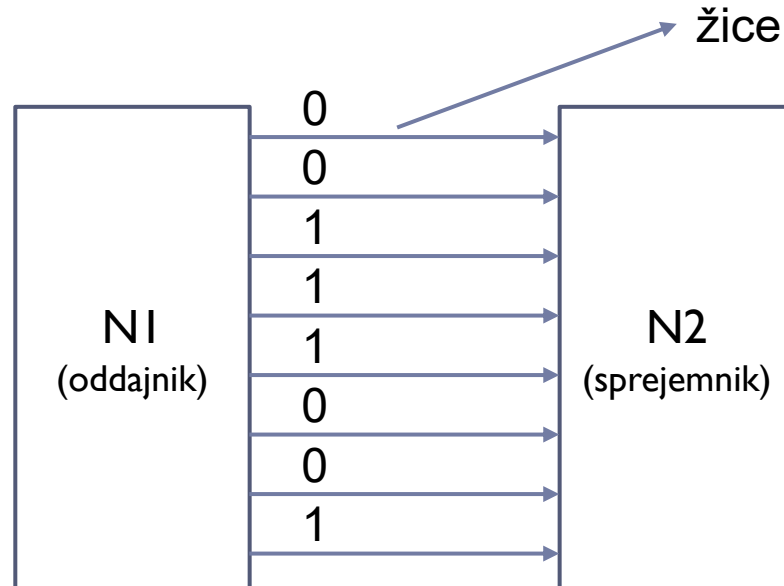


Primer paralelne in serijske komunikacije

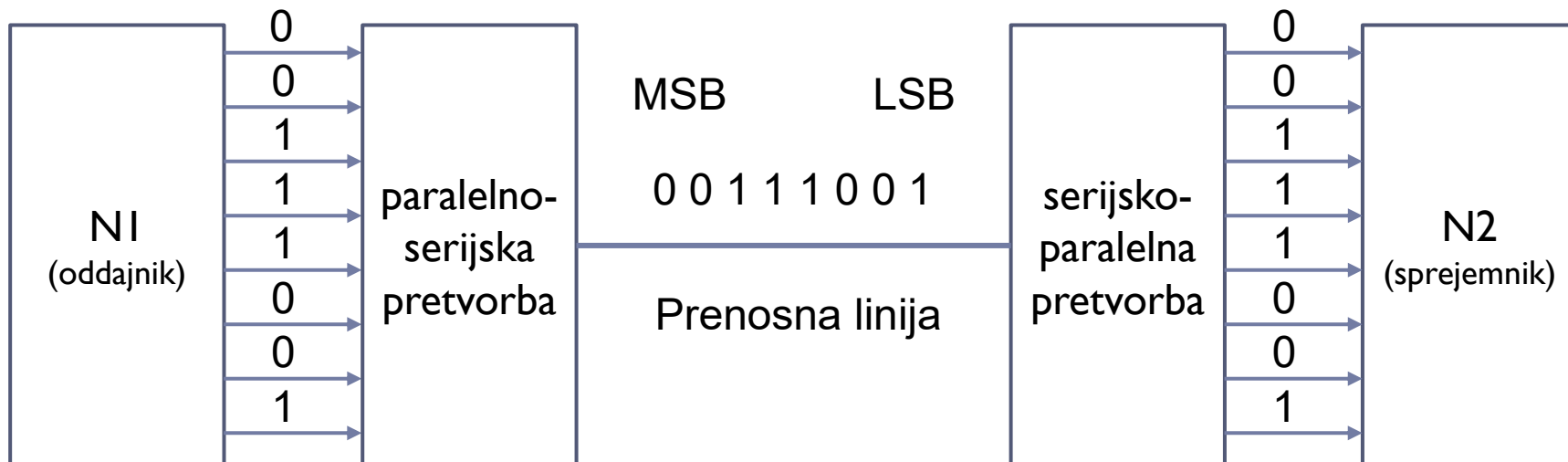
1. Podani sta dve napravi, ki si izmenjujeta podatke. Naprava N1 oddaja podatke in naprava N2 sprejema podatke. Narišite izvedbo paralelnega in serijskega prenosa za 8-bitne znake. Shemo narišite tako, da v napravi vpišete tudi ali je uporabljen oddajnik (ang. transmitter) ali sprejemnik (ang. receiver), 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



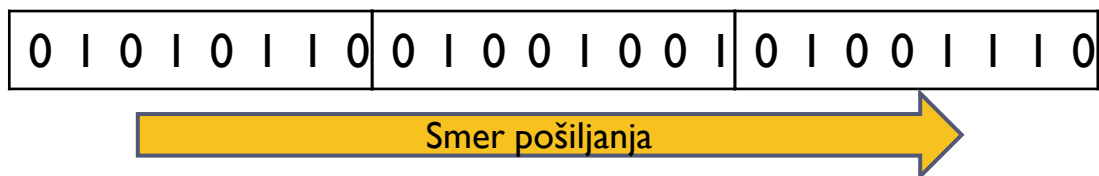
Serijski prenos



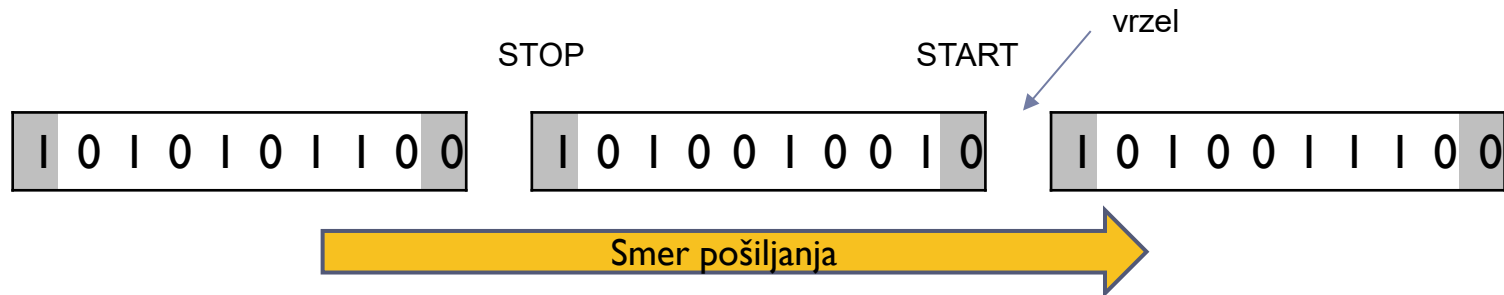
2. Naprava N1 pošilja podatke napravi N2. Napišite zaporedje podatkov za asinhronski in sinhronski serijski prenos 8-bitnih znakov v ASCII kodi. Označite smer pošiljanja bitov, ki poteka od leve proti desni. Niz znakov je enak VIN.

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

- Sinhronski način

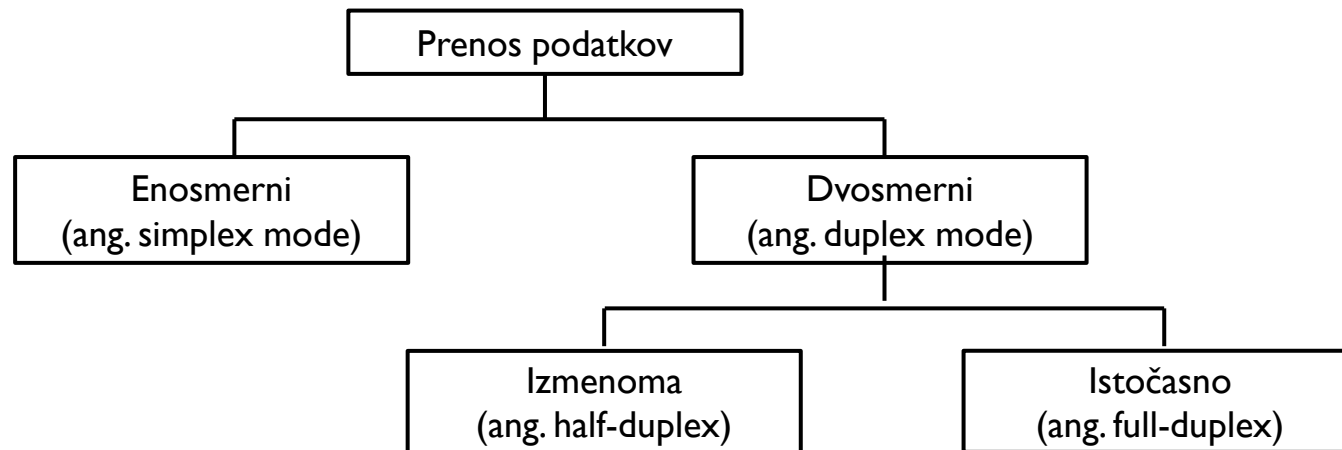


- Asinhronski način (dodana sta bita START in STOP)



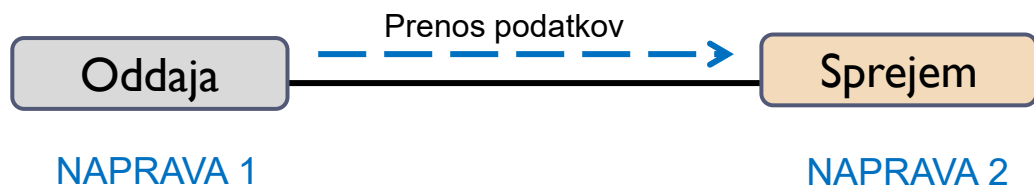
3.3 Način (smer) prenosa

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



3.3.1 Enosmerni prenos (ang. simplex)

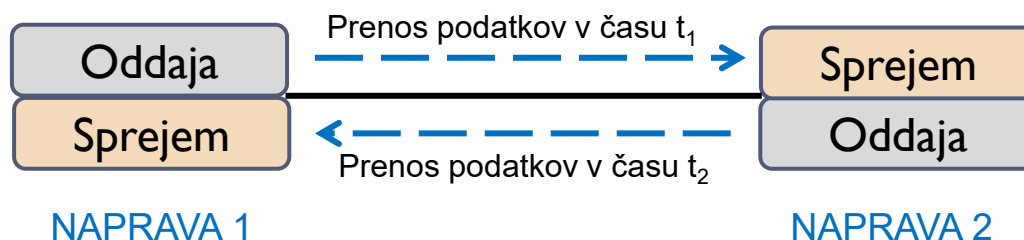
- ❑ Napravi sta povezani z eno linijo.
- ❑ Prenos poteka samo v eno smer:
 - ❑ ena naprava oddaja (ang. transceiver), druga sprejema signal (ang. receiver).



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

3.3.2 Dvosmerni izmenični prenos (ang. half duplex).

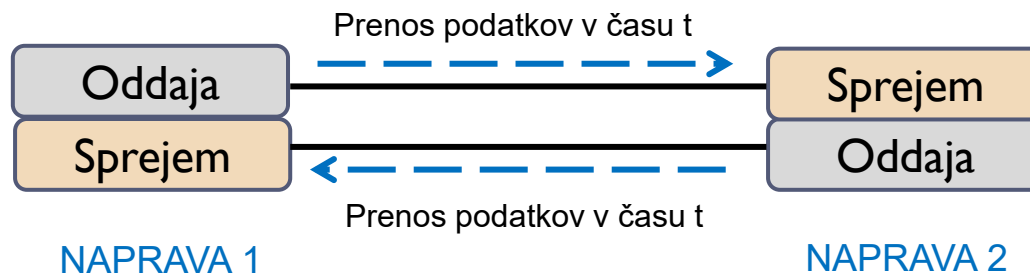
- Napravi sta povezani z eno linijo.



- 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:
 - RS485, vodila
 - “Walkie-talkie“
 - Internetni brskalniki

3.3.3 Dvosmerni istočasni prenos (ang. full duplex).

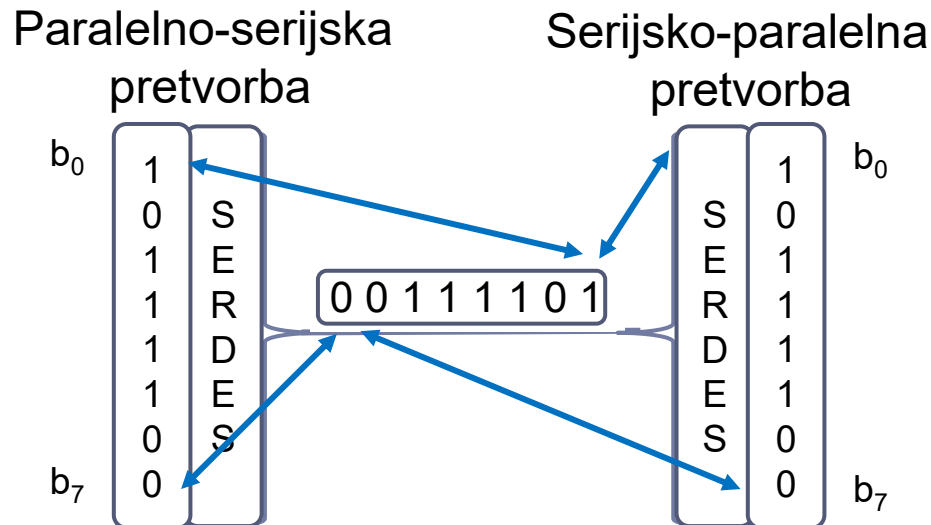
- ❑ Napravi sta povezani z dvema linijama.



- ❑ Prenos je možen hkrati v obe smeri.
- ❑ Obe napravi lahko istočasno pošiljata in sprejemata podatke.
- ❑ Primer uporabe:
 - RS232, PCIe
 - telefonsko omrežje

3.4 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.

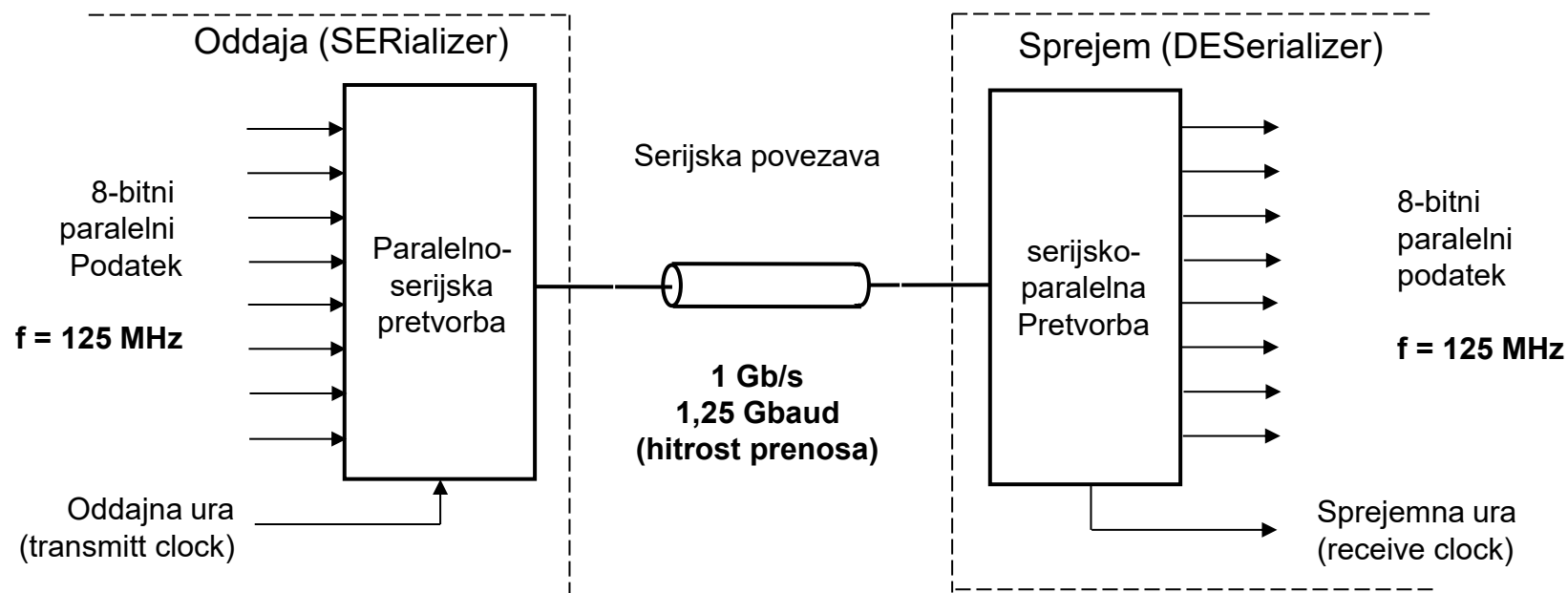


❑ Naprave SERDES

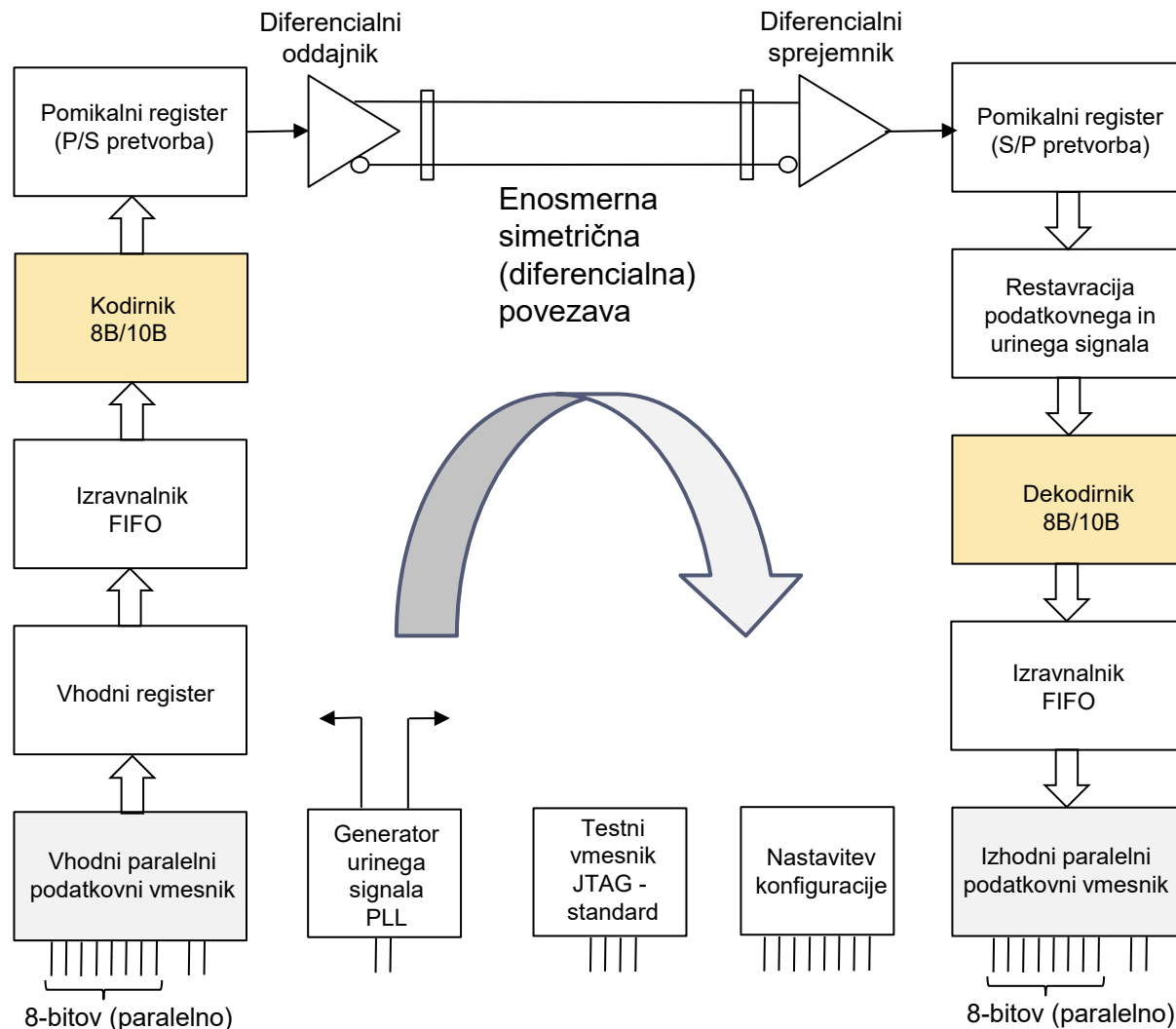
- SER – SERializer (prejme paralelne podatke in jih pretvori v zaporedni niz bitov)
- DES – DESerializer (prejme zaporedni niz bitov in ga pretvori v paralelne podatke)

❑ Uporaba: telekomunikacije, video, industrija

❑ Primer: Serijski prenos 8- bitnega podatka



■ SERDES - funkcijski diagram



3.5 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 v splošnem nista enaki, razen pri določenih pogojih.

3.5.1 Baudna hitrost

- Baudna hitrost (BR) je predvsem odvisna od pasovne širine B (ang. bandwith) 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?

$$B = f_{\max} - f_{\min} = ?$$

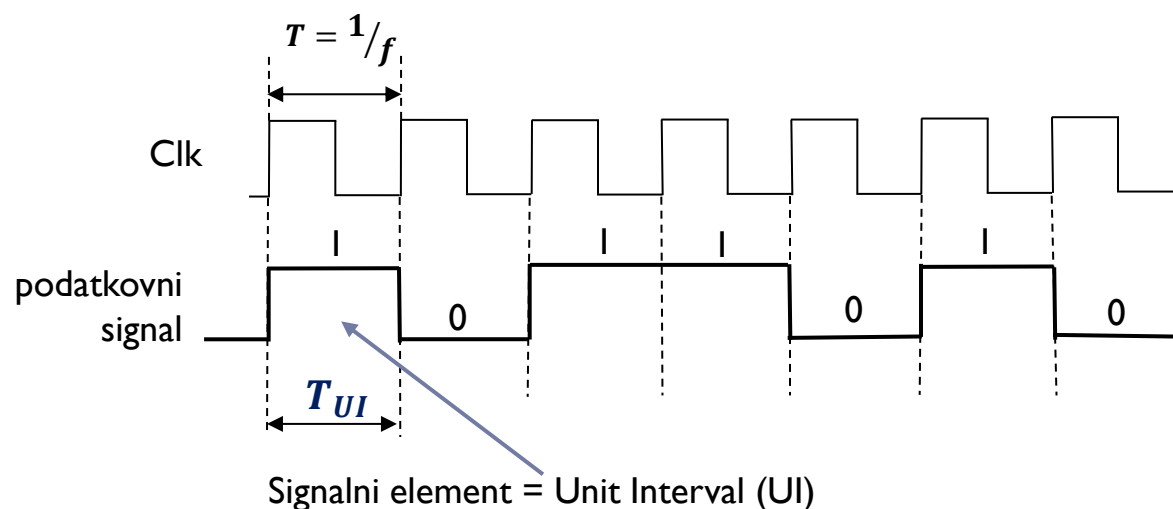
$$BR = 2 B = \dots$$

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.

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:

$$T_{UI} = T$$

3.5.2 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] :

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

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

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

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

3.5.2 Bitna hitrost

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

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

Primer: 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:

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 $\frac{S[W]}{N[W]}$

$$\log_{10} \left(\frac{S[W]}{N[W]} \right) = \frac{\frac{S}{N} [dB]}{10} = \frac{32 [dB]}{10} = 3.2 \rightarrow \frac{S[W]}{N[W]} = 10^{3.2} \cong 1584$$

ker je razmerje $\frac{S[W]}{N[W]} > 1000$, lahko v enačbi za bitno hitrost 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:

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

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

Primer višanja bitne hitrosti: Modulacije - 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]

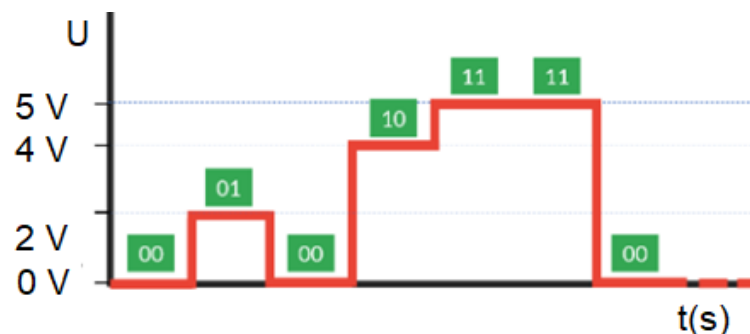
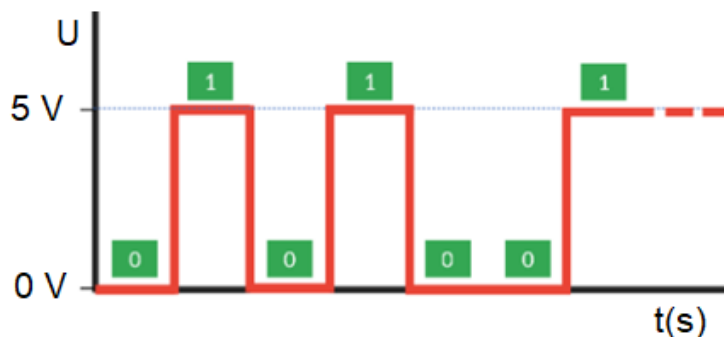
Primer od prej: Analogni telefonski kanal prenaša frekvence od 300 [Hz] do 3400 [Hz]. Kolikšna je teoretična največja baudna hitrost?

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

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

Primer višanja bitne hitrosti: več nivojev

- 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).

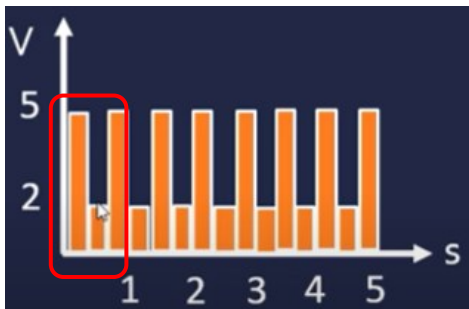


- BITNA in BAUDNA hitrost glede na število bitov, ki jih prenaša signalni element.**

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	$C = 4 BR$

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: $N = 2 \text{ [bit/aud]}$
 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: $N = C / BR \text{ [bit/aud]}$
3. Kakšna je baudna hitrost (BR) za podan časovni diagram?



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