



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
Fakultet  
elektrotehnike i  
računarstva

Preddiplomski studij

Računarstvo

# Komunikacijske mreže

2.

Fizički sloj

Sloj podatkovne poveznice

Ak.g. 2023./2024.

8.3.2024.



### slobodno smijete:

- **dijeliti** — umnožavati, distribuirati i javnosti priopćavati djelo
- **remiksirati** — prerađivati djelo

### pod sljedećim uvjetima:

- **imenovanje**. Morate priznati i označiti autorstvo djela na način kako je specificirao autor ili davatelj licence (ali ne način koji bi sugerirao da Vi ili Vaše korištenje njegova djela imate njegovu izravnu podršku).
- **nekomercijalno**. Ovo djelo ne smijete koristiti u komercijalne svrhe.
- **dijeli pod istim uvjetima**. Ako ovo djelo izmijenite, preoblikujete ili stvarate koristeći ga, preradu možete distribuirati samo pod licencom koja je ista ili slična ovoj.

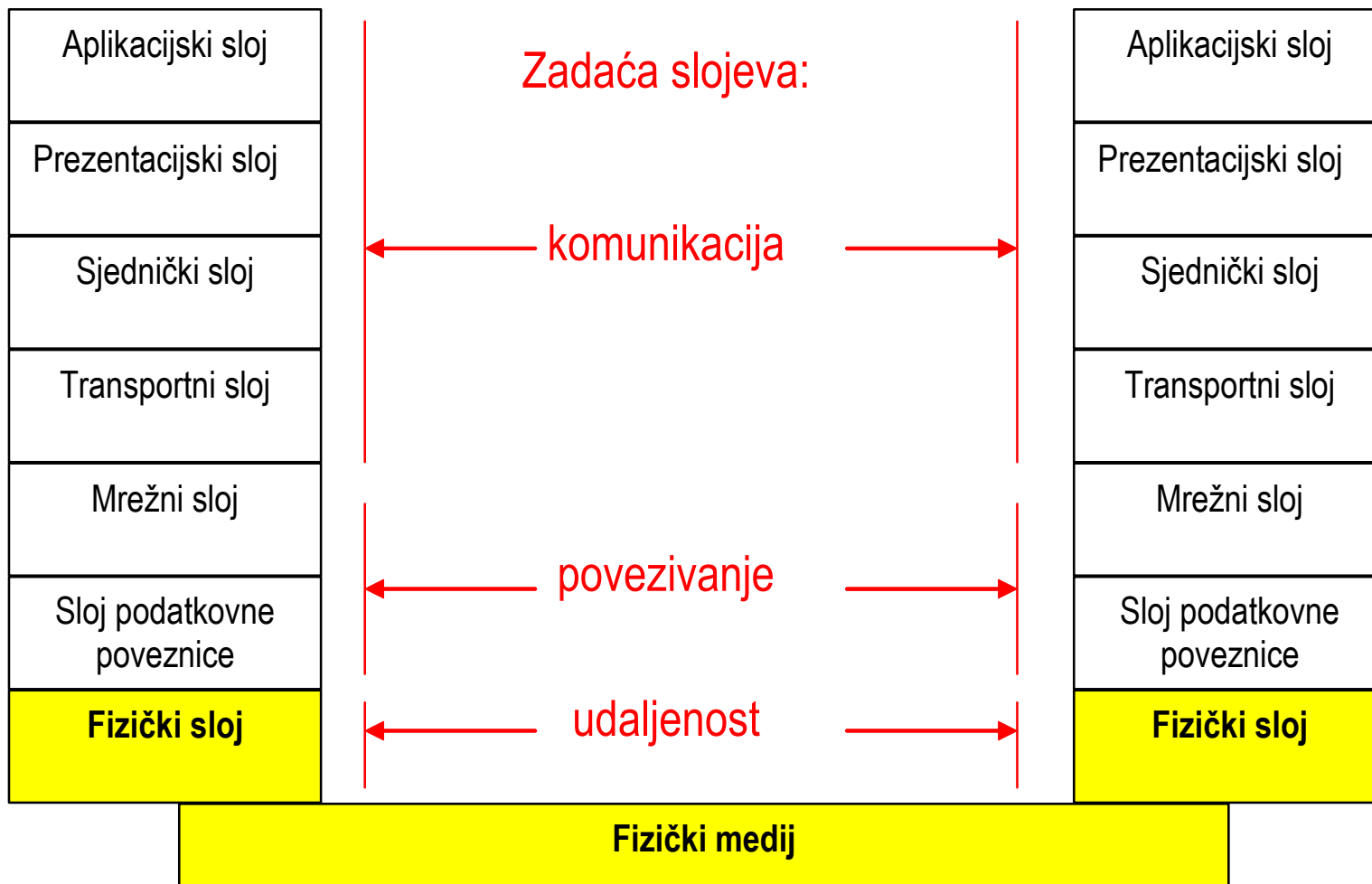
U slučaju daljnjeg korištenja ili distribuiranja morate drugima jasno dati do znanja licencijske uvjete ovog djela. Najbolji način da to učinite je poveznicom na ovu internetsku stranicu.

Od svakog od gornjih uvjeta moguće je odstupiti, ako dobijete dopuštenje nositelja autorskog prava. Ništa u ovoj licenci ne narušava ili ograničava autorova moralna prava.

Tekst licence preuzet je s <http://creativecommons.org/>.

- ◆ Fizički sloj
  - zadaća i oblikovanje
- ◆ Prijenosni medij
  - parica
  - koaksijalni kabel
  - optičko vlakno
  - radijski prijenos
  - višestruka uporaba
- ◆ Sloj podatkovne poveznice
  - zadaća i oblikovanje

# Fizički sloj i prijenosni medij



Zadaća fizičkog sloja:

- ◆ omogućiti prijenos na određenu udaljenost
- ◆ jedinica podataka: bit
- ◆ prijenos slijeda bita fizičkim medijem
- ◆ mehaničko, električko/optičko i vremensko sučelje s prijenosnim medijem

Prijenos informacije:

- ◆ električki
- ◆ optički (fotonički)

## Oblikovanje fizičkog sloja uključuje:

- ◆ odabir prijenosnog medija te
- ◆ načina prijenosa za zahtijevanu brzinu prijenosa i udaljenost.

## Na brzinu prijenosa i domet utječu:

- ◆ širina prijenosnog pojasa  $B$  (Hz)
- ◆ izobličenja u prijenosu (gušenje signala),
- ◆ interferencija (smetnje od vlastitog ili drugih signala),
- ◆ broj prijamnika (gušenje i izobličenje signala).

## Kapacitet komunikacijskog kanala određuju:

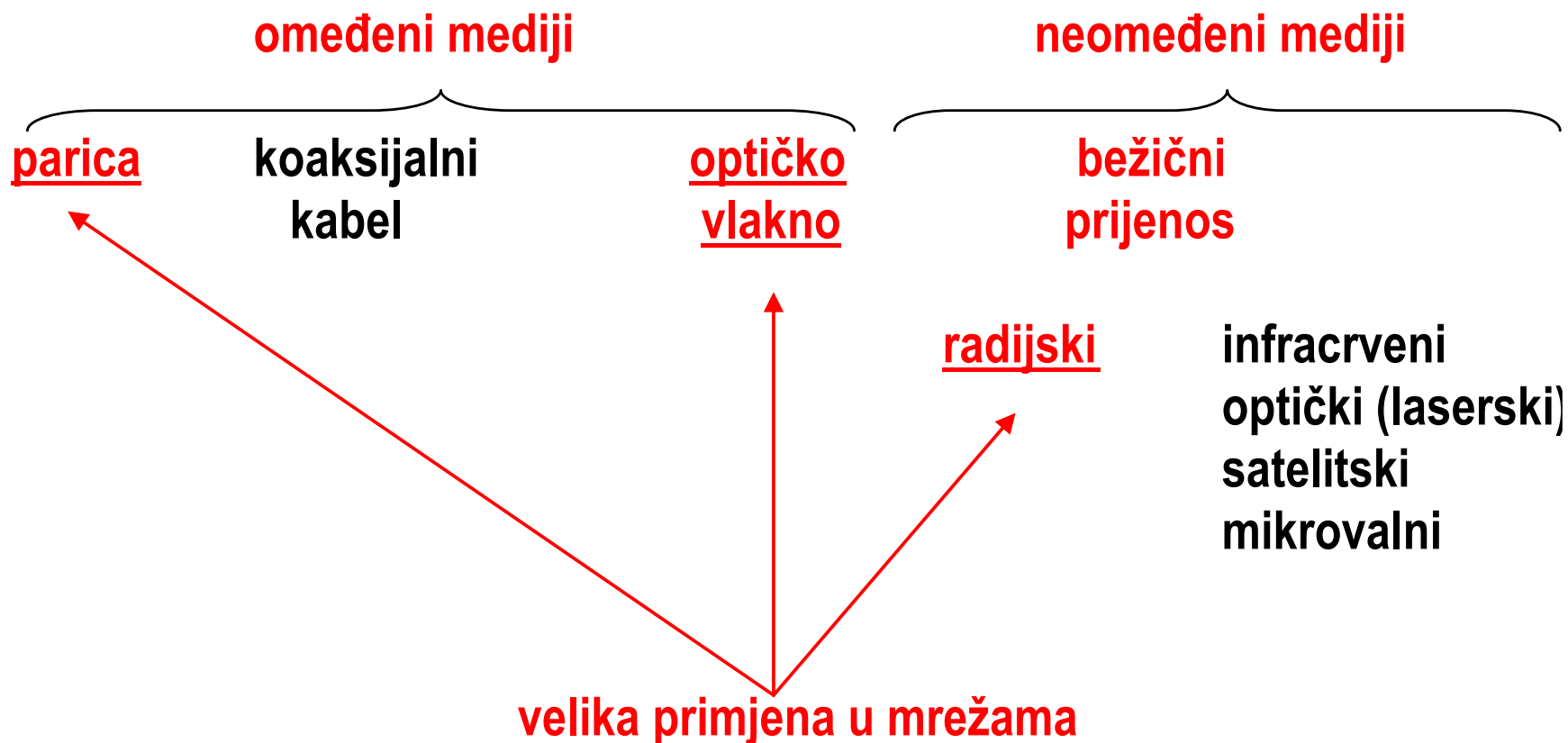
- ♦ širina prijenosnog pojasa  $B$
- ♦ odnos signal – šum  $S/N$

## Signalna domena prijenosa informacije:

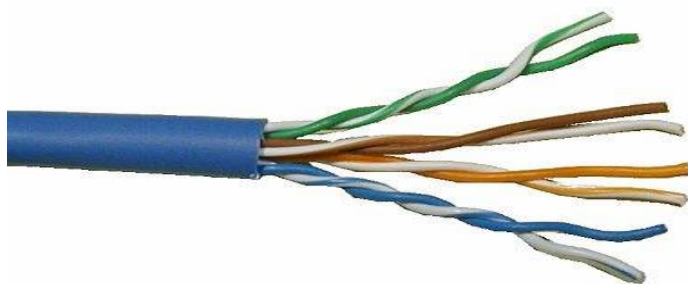
- ♦ **izvor**: pretvorba digitalnog signala – bita u signalne elemente prilagođene uvjetima prijenosa (modulacija, kodiranje),
- ♦ **prijenos** fizičkim medijem, uz moguće djelovanje smetnji koje izazivaju pogreške,
- ♦ **odredište**: pretvorba primljenih signalnih elemenata (demodulacija, dekodiranje) u digitalni signal – bit

## Teorija informacije!





engl. *pair*



- ◆ dva bakrena vodiča promjera do 1 mm koji su upredeni kako bi se smanjio međusobni elektromagnetski utjecaj
  - upredena parica (engl. *twisted pair*)
  - neoklopljena upredena parica (engl. *Unshielded Twisted Pair*, UTP)
  - oklopljena upredena parica (engl. *Shielded Twisted Pair*, STP)
- ◆ parica je jako rasprostranjena, prikladna i za analogni i za digitalni prijenos

## Brzina prijenosa ovisi o:

- ◆ debljini žice,
- ◆ duljini žice,
- ◆ načinu upredanja,
- ◆ načinu slaganja parica u kabel.

Kategorija parice (“CAT”) – klasifikacija prema mogućoj brzini prijenosa (npr. CAT 5 – primjena u LAN-ovim do 100 Mbit/s)

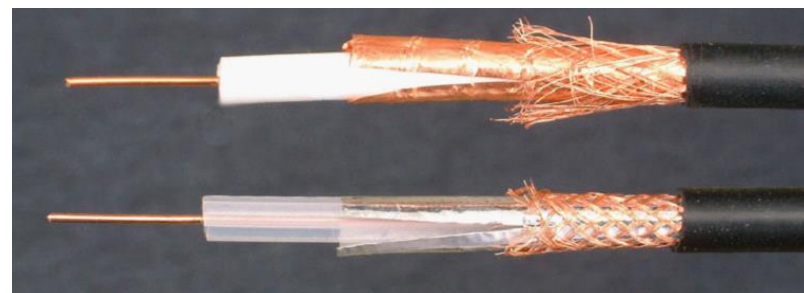
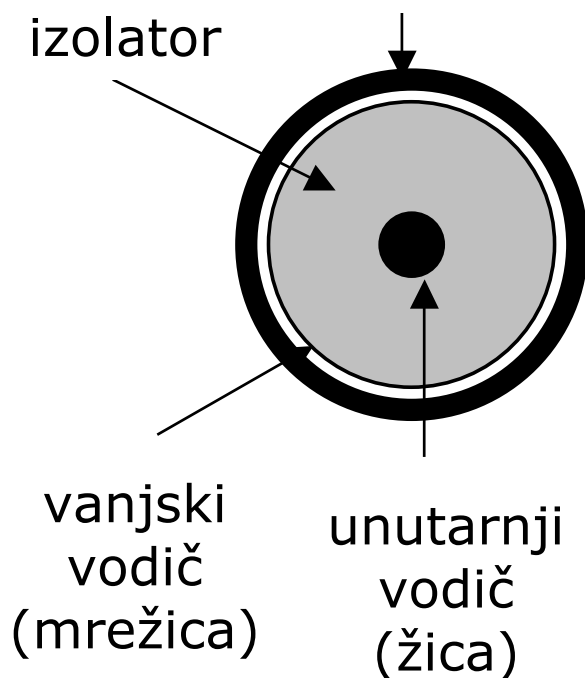
## Primjer ADSL:

- ◆ maksimum: **ili** brzina (dolazni smjer 8 Mbit/s, odlazni 640 kbit/s) **ili** udaljenost (5486 m) – **obrnuto proporcionalno!**
- ◆ RH: dobra izvedba parice u gradovima – duljina do 1km

engl. *coaxial cable* ("coax")

zaštita  
izolator

izolator

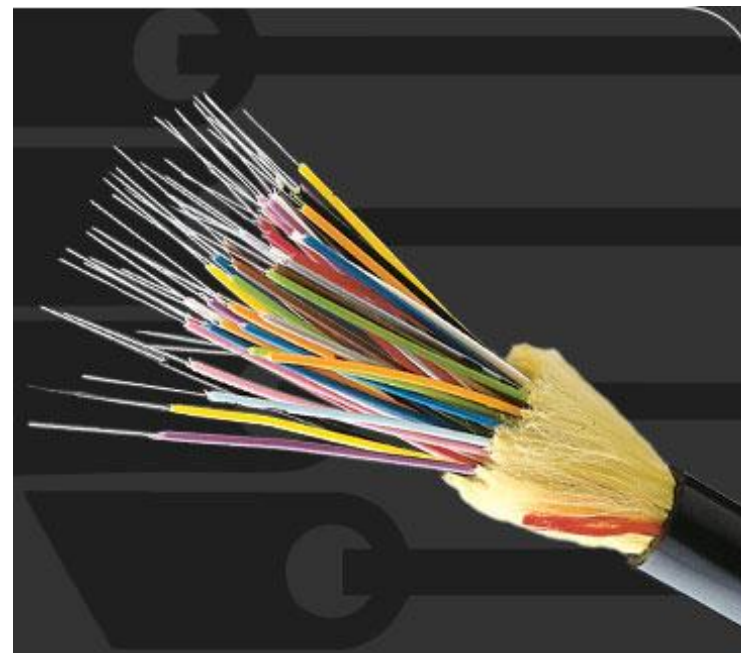
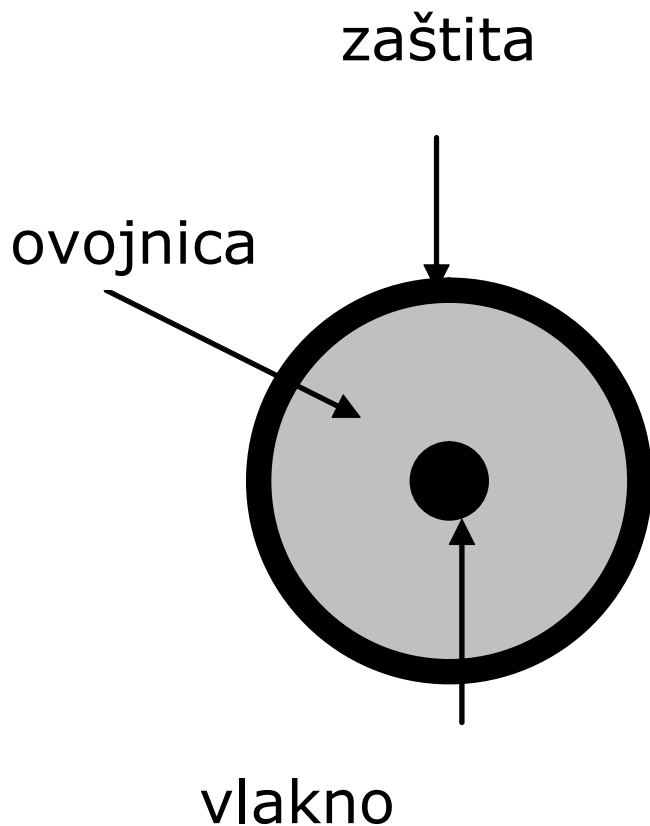


- ♦ velika širina pojasa i dobra zaštita od smetnji, ali
- ♦ lošije performanse od optičkih vlakana koja su ih istisnula iz uporabe
- ♦ primjena: kabelska TV

Fotografija preuzeta s [www.radioinc.com](http://www.radioinc.com)

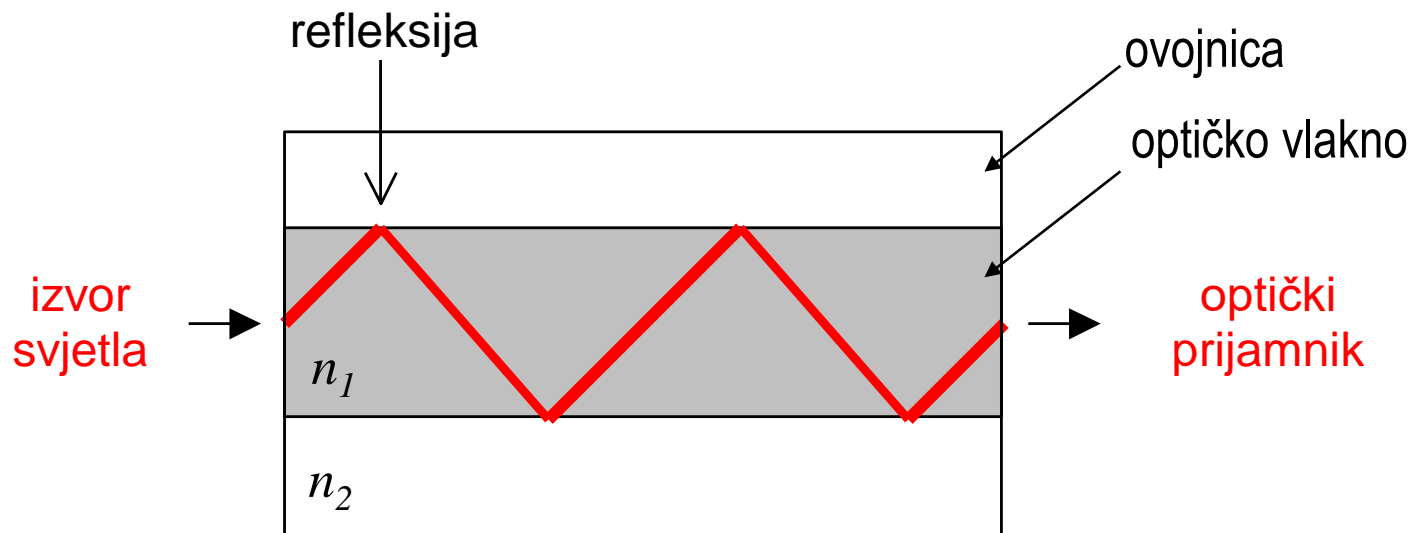
# Optičko vlakno (1)

engl. *fibre (fiber) optics*



- ♦ optičko vlakno i ovojnica: staklo
- ♦ kabel s optičkim vlaknima (engl. *fibre optic cable*), optički kabel sadrži više vlakana

Fotografija preuzeta s: [www.occfiber.com](http://www.occfiber.com)



- ♦ indeks loma ovojnice manji od indeksa loma vlakna kako bi se svjetlost zadržala u vlaknu ( $n_1 > n_2$ )

The Nobel Prize in Physics 2009 awarded to Charles Kuen Kao "for groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication"

## Jednomodno vlakno (engl. *single-mode fibre*):

- ♦ promjer vlakna (8-10,5  $\mu\text{m}$ ) nije veći od nekoliko valnih duljina svjetlosnog signala: rasprostiranje svjetla jednom zrakom (*single mode*)
- ♦ složenija i skuplja oprema
- ♦ veće brzine prijenosa, prienos na veće udaljenosti (npr. 50 Gbit/s, 100 km)

## Višemodno vlakno (engl. *multimode fibre*):

- ♦ promjer vlakna (60-100  $\mu\text{m}$ ) mnogo veći od valne duljine svjetlosnog signala kojeg prenosi: rasprostiranje svjetla s više zraka (*multimode*)
- ♦ jednostavnija i jeftinija oprema
- ♦ manje brzine prijenosa, prienos na kraće udaljenosti (npr. 10 Gbit/s, 500 m)

## Prednosti optičkog vlakna:

- ♦ veća brzina prijenosa (Gbit/s, Tbit/s)
- ♦ malo gušenje signala, tako da se obnavljanje signala provodi na većim udaljenosti, od nekoliko desetaka do iznad sto kilometara (npr. za jednomodno vlakno s 50 Gbit/s na 100 km)
- ♦ neosjetljivost na elektromagnetske utjecaje i koroziju,
- ♦ tanka i lagana,
- ♦ prisluškivanje teško izvedivo.



## Nepovoljne strane optičkog vlakna:

- ◆ jednosmjerni prijenos, tako da su potrebna dva vlakna za dvosmjerni prijenos,
- ◆ optička sučelja složenija i skuplja od električkih,
- ◆ instrumentarij za izvedbu i održavanje mreža složeniji i skuplji.

## Primjeri:

- ◆ prijenos različitih informacijskih sadržaja paricom (modem, ADSL) i optičkim vlaknom **KM-2015\_02\_FiberSpeed**

## Propagacijsko kašnjenje (rasprostiranje) – mala razlika

$$d = L/c$$

L udaljenost (m)

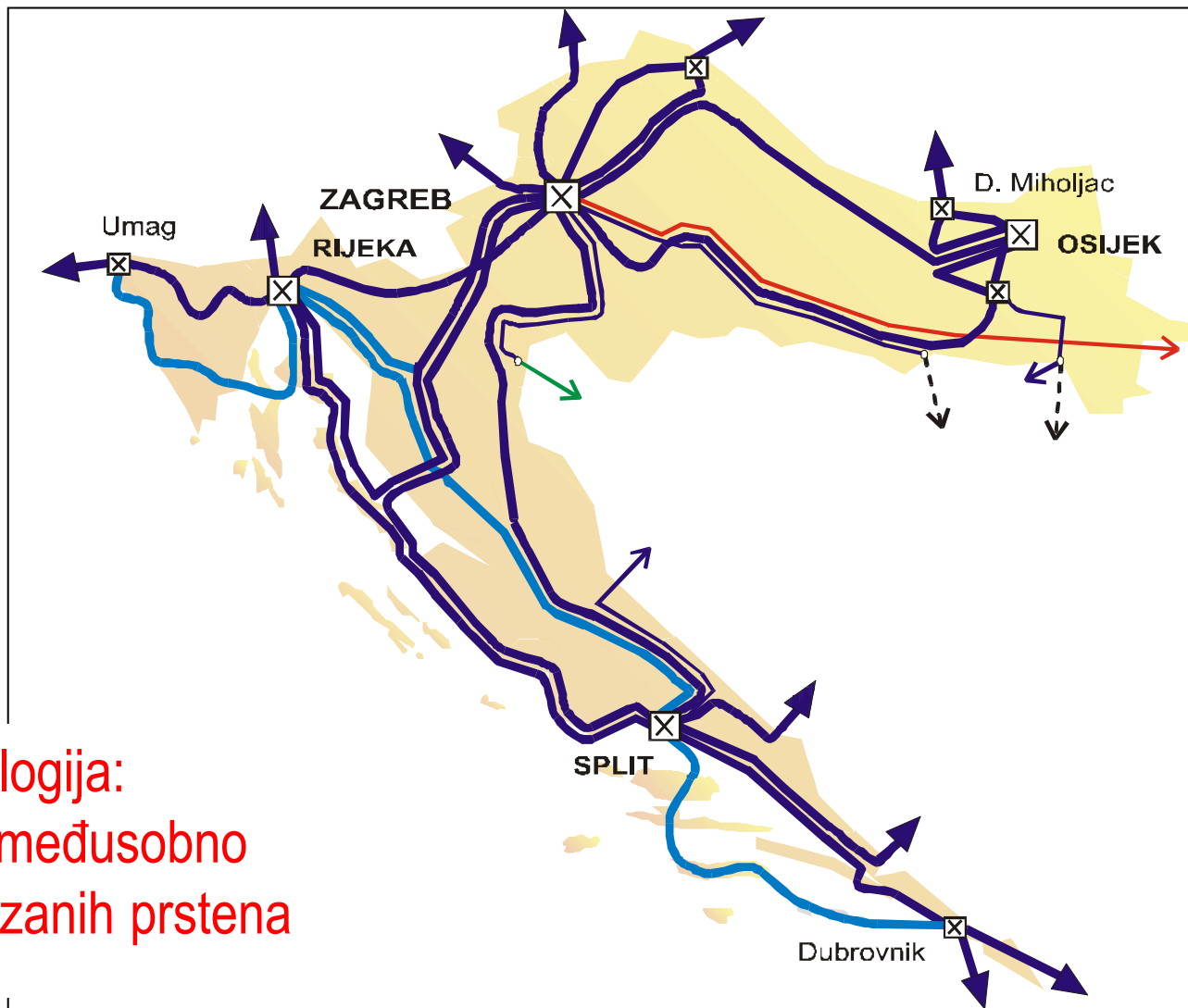
c brzina signala (svjetlosti) u mediju (m/s)

bakreni vodič:  $c = 2,3 \times 10^8$  m/s

optičko vlakno:  $c = 2 \times 10^8$  m/s

## Primjeri propagacijskog kašnjenja:

- optičkim vlaknom 1 km: 5  $\mu$ s
- optičkim vlaknom Zagreb – Split (400 km): 2 ms
- optičkim vlaknom oko Zemlje (40.000 km): 0,2 s
- Koliko će trajati prijenos 1 Gbita podataka iz Zagreba u Split optičkim sustavom koji osigurava propusnost od 1 Gbit/s?

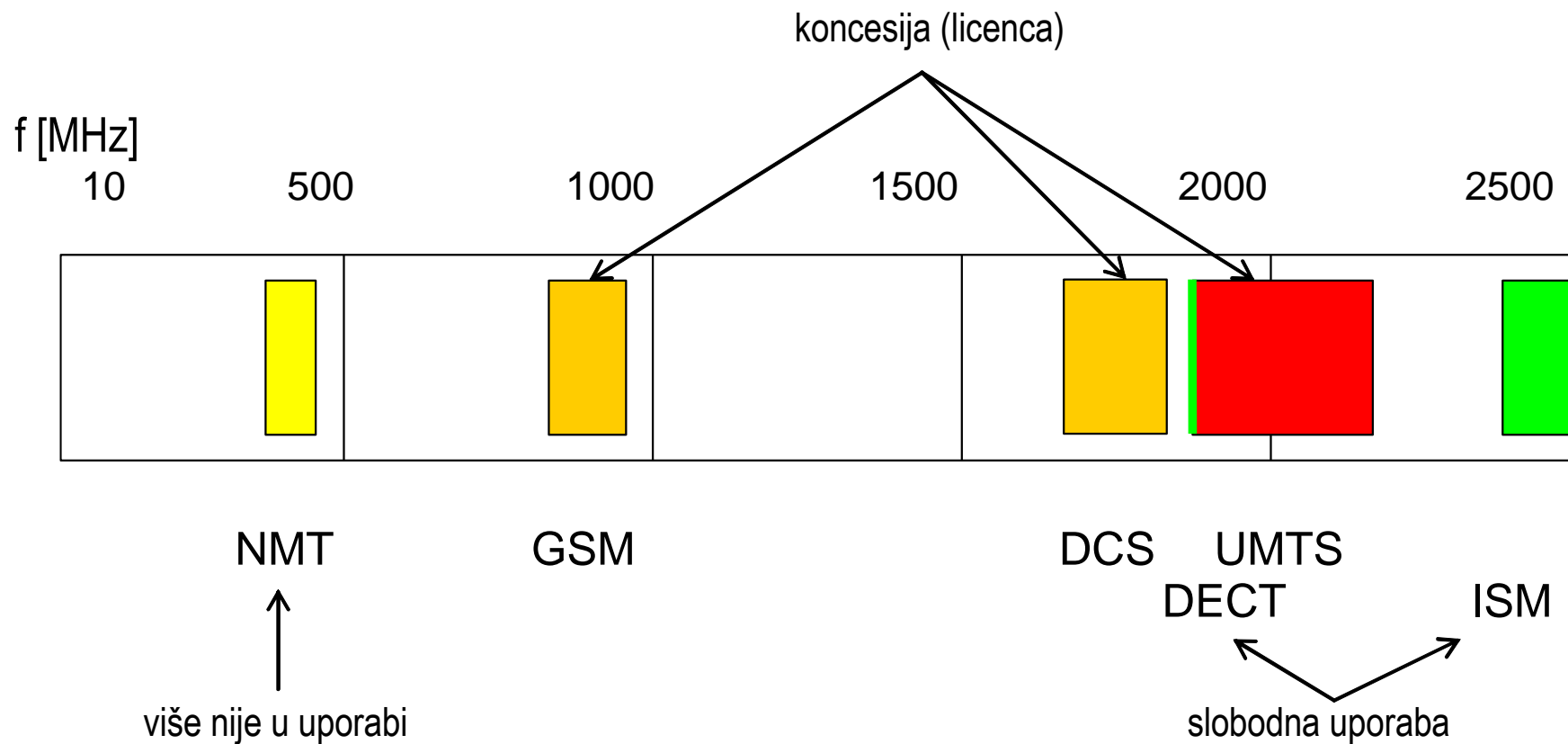


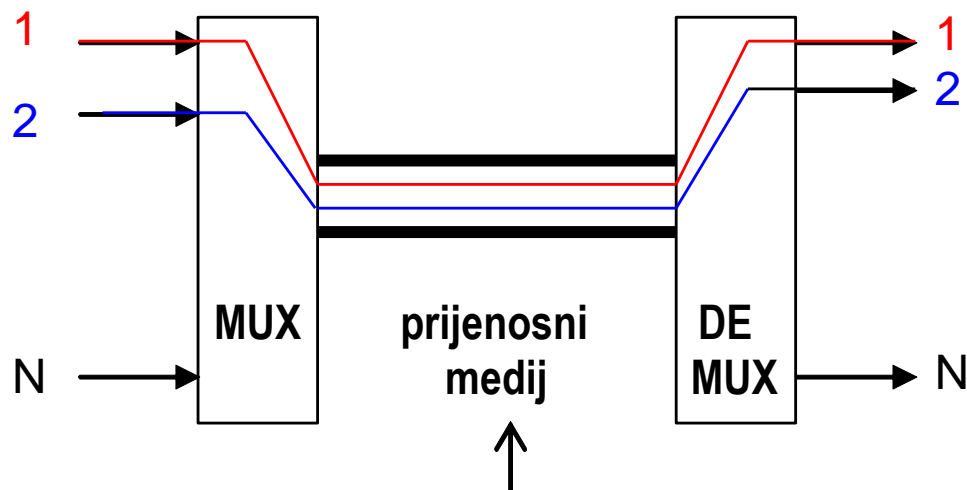
Topologija:  
više međusobno  
povezanih prstena

- ◆ prijenos informacije elektromagnetskim valom u slobodnom prostoru u definiranom dijelu **radiofrekvencijskog spektra**
- ◆ prednost pred infracrvenim (domet, usmjerenost, od točke do točke) i laserskim prijenosom (osjetljivost na atmosferske utjecaje)
- ◆ primjena u mreži:
  - pristup korisnika javnoj pokretnoj mreži,
  - pristup korisnika lokalnoj mreži,
  - povezivanje dvaju točaka (npr. usmjerena mikrovalna veza).

- ◆ upravljanje radiofrekvencijskim spektrom:
  - međunarodni dogovor i nacionalna provedba kojom rukovodi regulatorno tijelo (Hrvatska regulatorna agencija za mrežne djelatnosti, [www.hakom.hr](http://www.hakom.hr)),
  - ograničeni resurs koji ograničava i broj bežičnih mreža,
- ◆ uporaba dijela radiofrekvencijskog spektra uz naplatu, npr.:
  - javne pokretne mreže s radijskim pristupom (GSM, UMTS, LTE)
- ◆ slobodna uporaba dijela radiofrekvencijskog spektra, npr.:
  - bežični telefon (DECT)
  - bežična lokalna mreža u pojasu ISM (*Industrial Scientific Medical*)

# Radiofrekvencijski spektar (2)



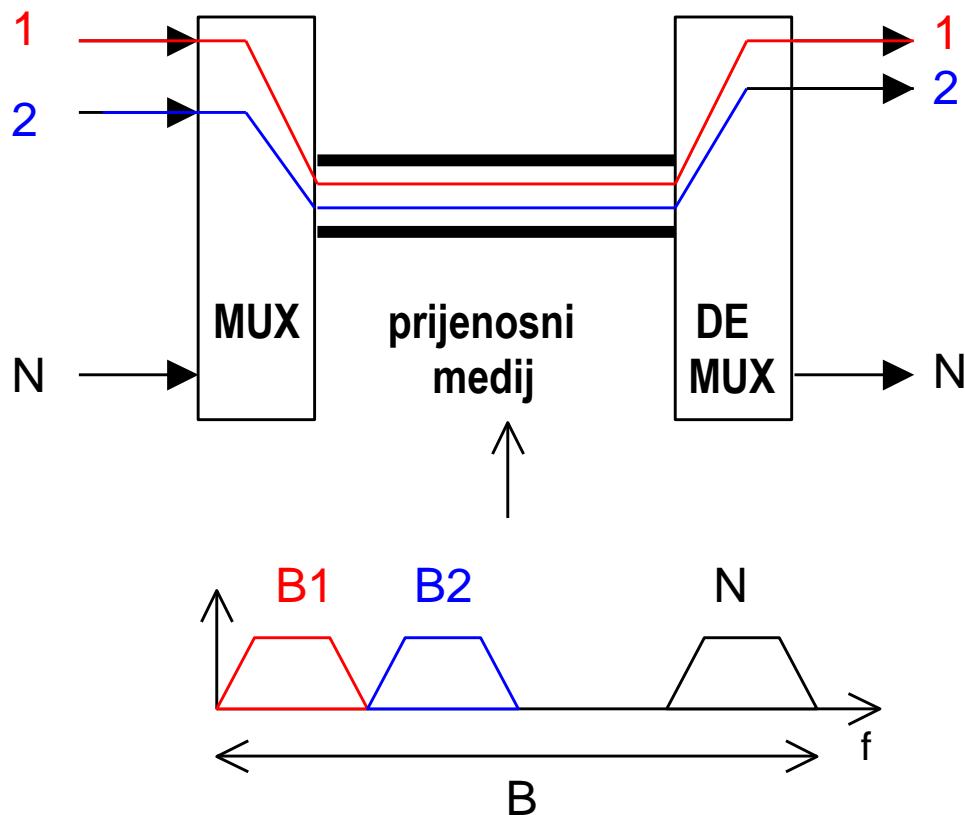


Podjela po komponenti  
informacijskog volumena:

- frekvencija
- vrijeme
- valna duljina
- kod

Prijenosni medij između dvije  
točke upotrijebiti za povezivanje  
više izvora i odredišta istodobno

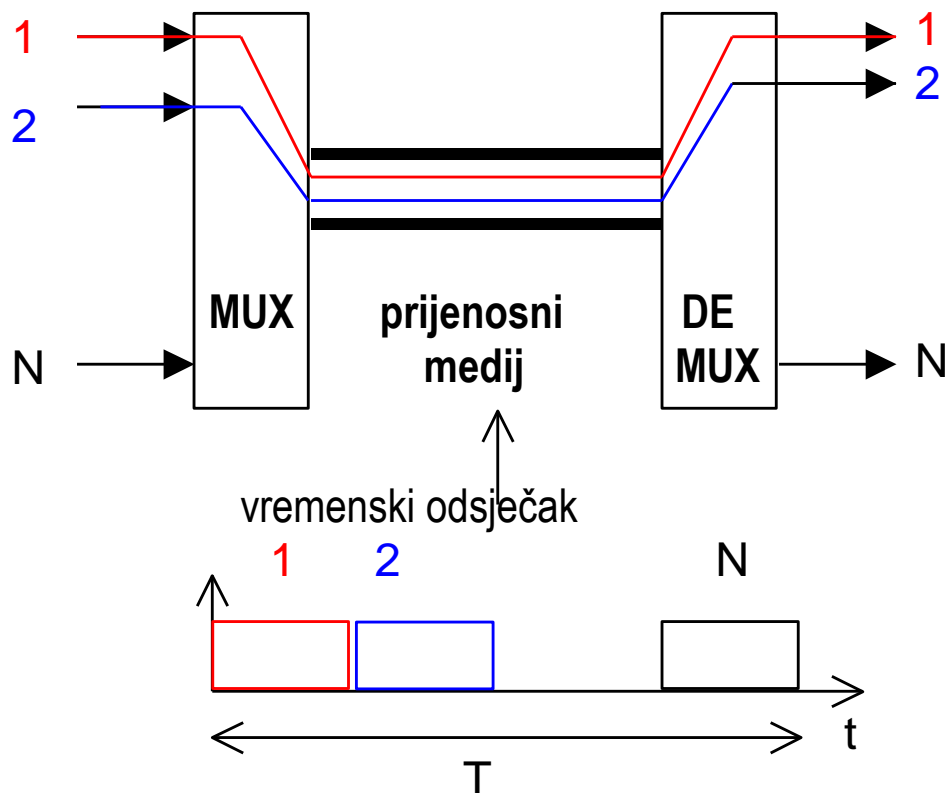
- ◆ svakom paru izvor-odredište  
dodjeljuje se drugi dio odabrane  
komponente informacijskog  
volumena
- ◆ višestruka uporaba –  
multipleksiranje (engl.  
*multiplexing*)
  - multipleksor (MUX)
  - demultipleksor (DEMUX)



engl. *Frequency Division Multiplexing, FDM*

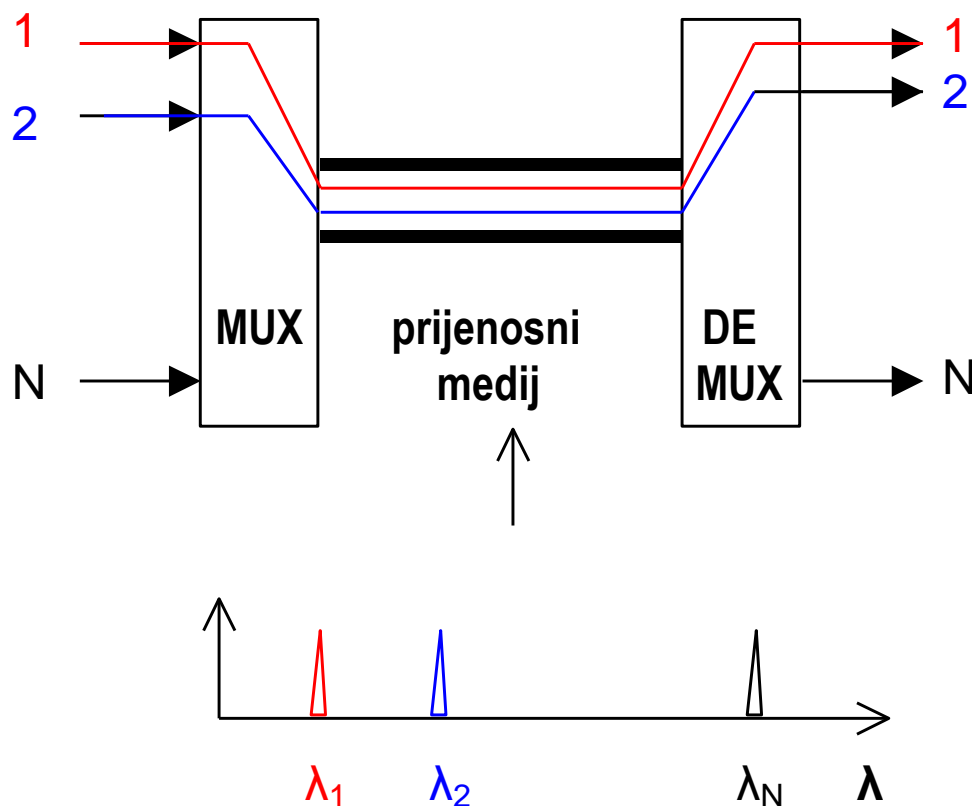
- ♦ svakom paru izvor-odredište dodjeljuje se drugi dio frekvencijskog pojasa  $B$
- ♦ frekvencijski odvojeni kanali na istom prijenosnom mediju!





engl. *Time Division Multiplexing*, TDM

- ◆ svakom paru izvor-odredište dodjeljuje se fiksni vremenski odsječak unutar okvira trajanja  $T$
- ◆ okviri se ponavljaju i odsječci ciklički izmjenjuju (1, 2, ..,  $N$ , 1, 2, ..)
- ◆ vremenski odvojeni kanali na istom prijenosnom mediju!



engl. *Wavelength Division Multiplexing, WDM*

- ♦ samo optički prijenos!
- ♦ svakom paru izvor-odredište dodjeljuje se druga valna duljina  $\lambda$
- ♦ kanali odvojeni valnim duljinama na istom prijenosnom mediju!

## Pulsno kodna modulacija

(engl. *Pulse Code Modulation*, PCM)

- ◆ osnovna primjena: digitalizacija govora u telefonskoj mreži
  - govor: analogni signal 300 – 3400 Hz ( $B = 4$  kHz)
  - uzimanje uzoraka frekvencijom  $2B = 8$  kHz, tj. svakih 125  $\mu$ s, kodiranje svakog uzorka s 8 bita, što daje  $8 \times 8 = 64$  kbit/s
- ◆ okvir:
  - trajanje 125  $\mu$ s
  - 32 kanala: 30 govornih
    - 1 sinkronizacijski (usklađivanje predajnika i prijamnika)
    - 1 signalizacijski (pozivni broj, stanje poziva, ....)
  - kapacitet:  $32 \times 64 = 2048$  kbit/s = 2,048 Mbit/s ← “2 Mbit/s”

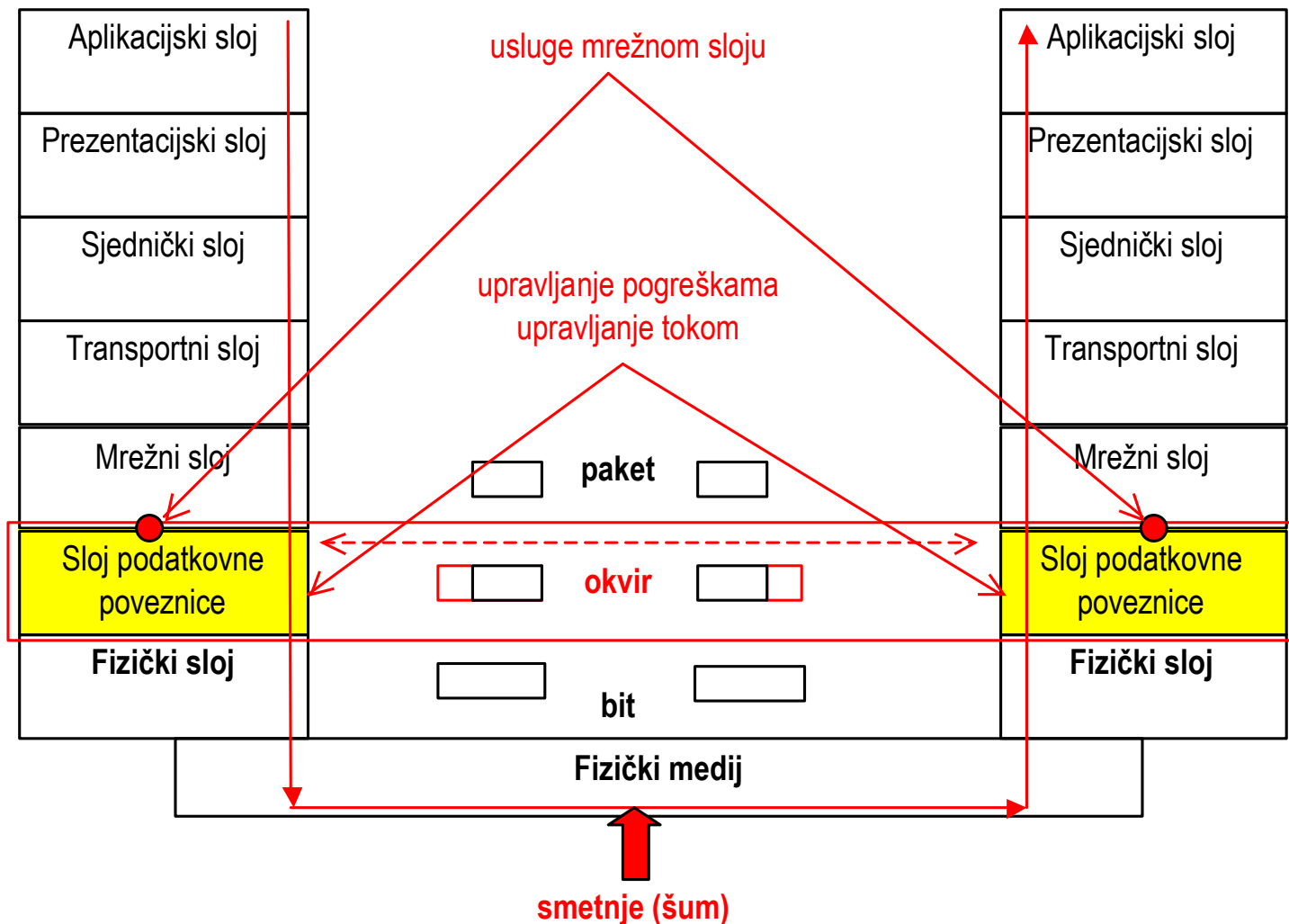
## Sinkrona digitalna hijerarhija

(engl. *Synchronous Digital Hierarchy*, SDH)

- ◆ prijenos bita u ekstremno točnim trenucima (usklađenost predajnika i prijamnika) upravljan glavnim satom točnosti  $10^9$  (atomski sat)
- ◆ mogućnost multipleksiranja kanala različitih kapaciteta
- ◆ okvir:
  - sinkroni transportni modul (engl. *Synchronous Transport Module*, STM)
  - u RH su u primjeni STM-1 (155 Mbit/s), STM-4 (620 Mbit/s) i STM-16 (2500 Mbit/s)

# Sloj podatkovne poveznice

# Sloj podatkovne poveznice (1)



Zadaća:

- ◆ omogućiti povezivanje dva izravno povezana (susjedna) čvora:
  - pružanje usluge mrežnom sloju,
  - obrada pogrešaka u prijenosu,
  - upravljanje tokom podataka.
- ◆ jedinica podataka: okvir (engl. *frame*)

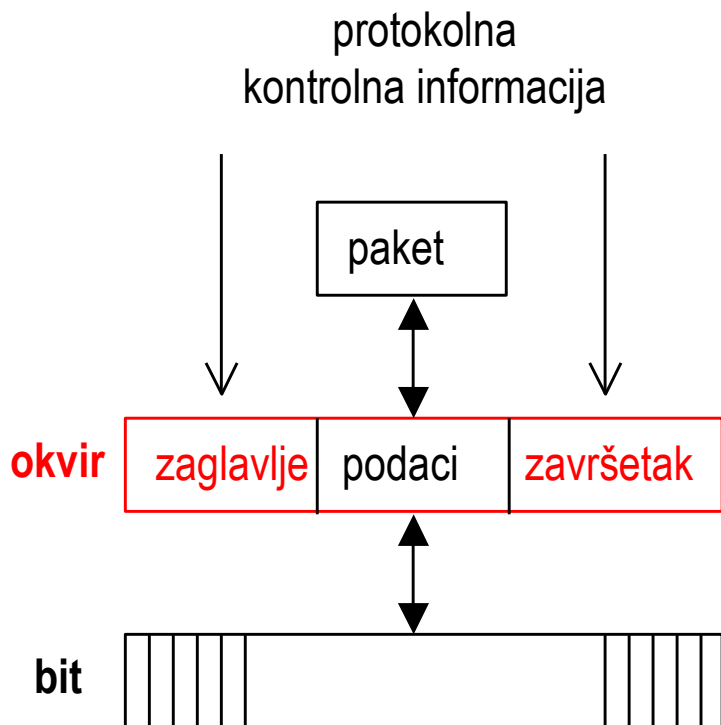
Problemi koji utječu na učinkovitost i pouzdanost:

- ◆ konačni kapacitet kanala, kašnjenje, djelovanje smetnji koje izazivaju pogreške bita, kvarovi, ....

## Oblikovanje podatkovne poveznice uključuje:

- ◆ Definiranje jedinice podataka - okvira
- ◆ Način rukovanja jedinicama podataka mrežnog sloja većima od okvira: fragmentiranje
- ◆ Definiranje usluge mrežnom sloju: spojna/nespojna, s potvrdom/bez potvrde
- ◆ Način upravljanja pogreškama: otkrivanje, ispravljanje
- ◆ Način upravljanja tokom: izvor ne odašilje više podataka nego što ih odredište može primiti





## Sadržaj okvira:

- ♦ polje podataka (engl. *payload*)
- ♦ polja s upravljačkom informacijom:
  - ispred polja podataka: zaglavlje (engl. *header*)
  - iza polja podataka: završetak (engl. *trailer*)
- ♦ u polje podataka okvira smješta se protokolna jedinica podataka mrežnog sloja, npr. paket

## Duljina okvira:

- ◆ fiksna, utvrđena unaprijed ili
- ◆ varijabilna, zbog varijabilnog polja podataka, pri čemu je utvrđena najveća moguća duljina

## Veličina polja podataka u okviru:

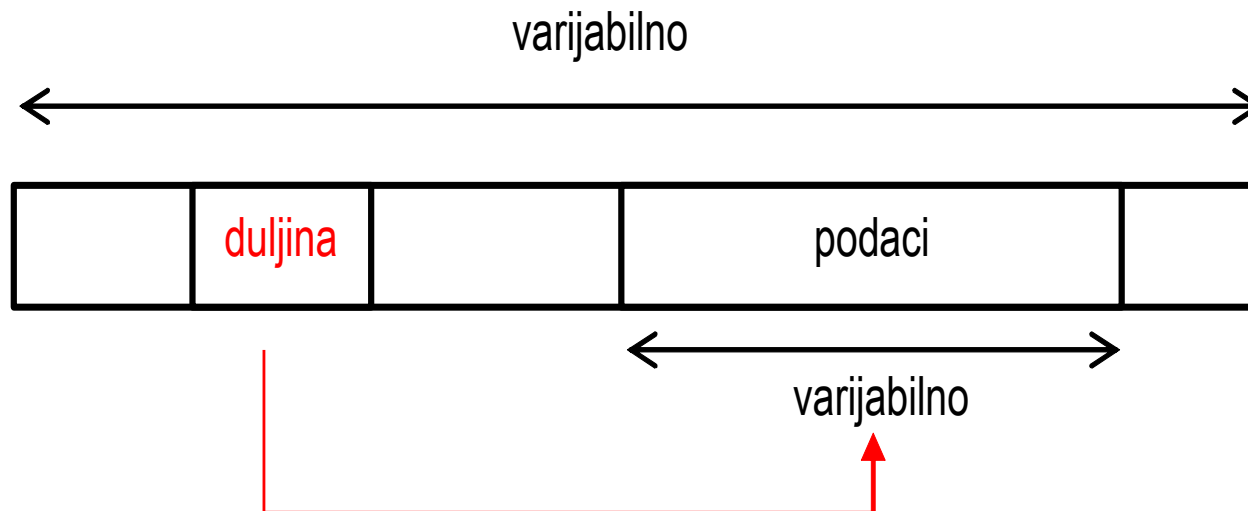
- ◆ veća ili jednaka mrežnoj jedinici podataka: mrežna jedinica podataka se smješta u okvir
- ◆ manja od mrežne jedinice podataka: mrežna jedinica podataka se dijeli na više manjih dijelova (fragmenata, segmenata) koji se smještaju svaki u poseban okvir



Ukoliko su podaci koji se prenose (tj. mrežna jedinica podataka) kraći od duljine okvira, dodaje se tzv. punjenje (engl. *filler*), odnosno ispuna (engl. *padding*) do pune duljine okvira

Primjer:

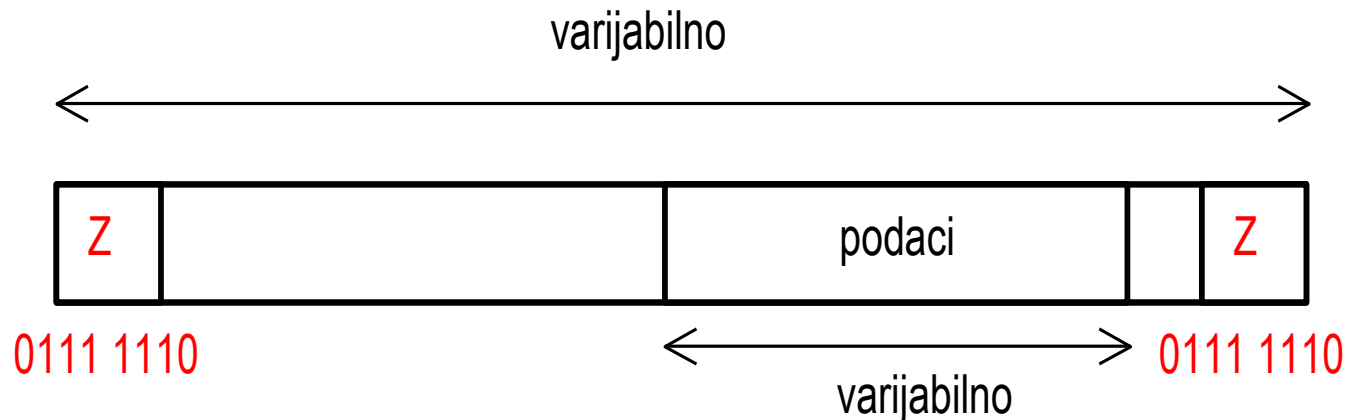
- sloj podatkovne poveznice na radijskom sučelju mreže GSM



Varijabilno je najčešće samo polje podataka, tako da se u zaglavlju specificira duljina, tako da prijamnik može odrediti kraj okvira.

Primjer:

- lokalna mreža IEEE 802.3

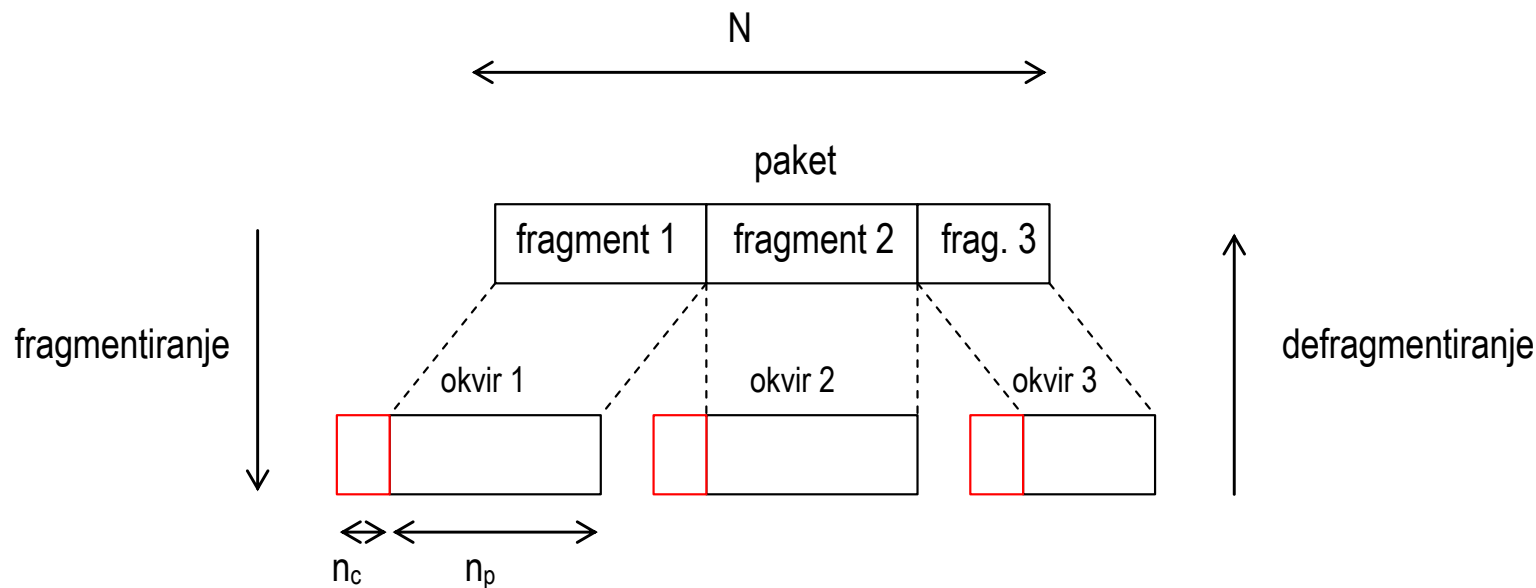


Označavanje početka i kraja posebnim znakom – zastavicom (engl. *flag*)

- ♦ opasnost: kombinaciju bita u polju podataka koja odgovara zastavici prijamnik će prepoznati kao kraj okvira
- ♦ rješenje: ubacivanje bita (engl. *bit stuffing*) 0 nakon 11111 u predajniku i njegovo izbacivanje u prijamniku

Primjer:

- ♦ protokoli vrste HDLC (*High-level Data Link Control*)



Na predajnoj strani se paket dijeli na fragmente, a svaki fragment prenosi posebnim okvirom.

Na prijamnoj se strani iz primljenih okvira (fragmenata) sastavlja paket.

## Vrste usluga s obzirom na način razmjene jedinice podataka:

- ◆ nespojna
- ◆ spojna

## Vrste usluga s obzirom na potvrdu prijama:

- ◆ bez potvrde
- ◆ s potvrdom

Smislene kombinacije: nespojna bez potvrde, nespojna s potvrdom, spojna s potvrdom

engl. *unacknowledged connectionless service*

## Opis usluge:

- ◆ izvor šalje neovisne okvire (nema logičke veze)
- ◆ odredište ne potvrđuje prijam – **gubitak okvira moguć!**

## Primjena:

- ◆ prijenos podataka uz malu vjerojatnost pogreške bita (npr. u lokalnoj mreži),
- ◆ komunikacija u stvarnom vremenu (npr. prijenos digitaliziranog govora)



engl. *acknowledged connectionless service*

## Opis usluge:

- ◆ izvor šalje neovisne okvire (nema logičke veze)
- ◆ odredište potvrđuje prijam svakog okvira zasebno
- ◆ ukoliko ne primi potvrdu, izvor ponovno šalje okvir – retransmisija (engl. *retransmission*)

## Primjena:

- ◆ prijenos s jako izraženim smetnjama (npr. bežični)

engl. *acknowledged connection-oriented service*

## Opis usluge:

- ◆ uspostavljanje logičke veze između izvora i odredišta prethodi razmjeni okvira, po završetku razmjene okvira veza se prekida
- ◆ svaki okvir označava se brojem kako bi se moglo jamčiti da će:
  - svaki okvir biti primljen samo jednom
  - svi okviri biti primljeni u ispravnom redoslijedu

## Primjena:

- ◆ ako se zahtijeva visoka pouzdanost

engl. *error control*

## Problem:

- ◆ djelovanje smetnji izaziva pogreške bita ( $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$ )
- ◆ pogreške su slučajne, a događaju se pojedinačno ili u snopu (engl. *burst*), tj. skupini bita u nizu
- ◆ mjera kvalitete digitalnog prijenosa  
učestalost pogreške bita (engl. *Bit Error Rate, BER*),  $10^{-n}$
- ◆ npr. kod optičkog prijenosa zahtijeva se  $BER = 10^{-9}$ , što znači da broj neispravnih bita ne smije biti veći od jednoga na svakih  $10^9$

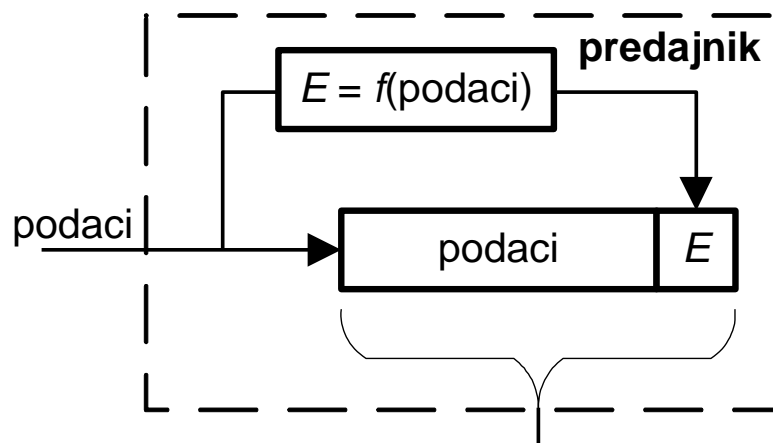
Komunikacija se nikad ne odvija u idealnim uvjetima tako da se pogreške u prijenosu ne mogu isključiti. Zaštitno kodiranje pretpostavka je za **upravljanje pogrešakama**, tj. smanjenje broja pogrešno isporučenih bita na odredištu.

Zaštitno kodiranje omogućuje:

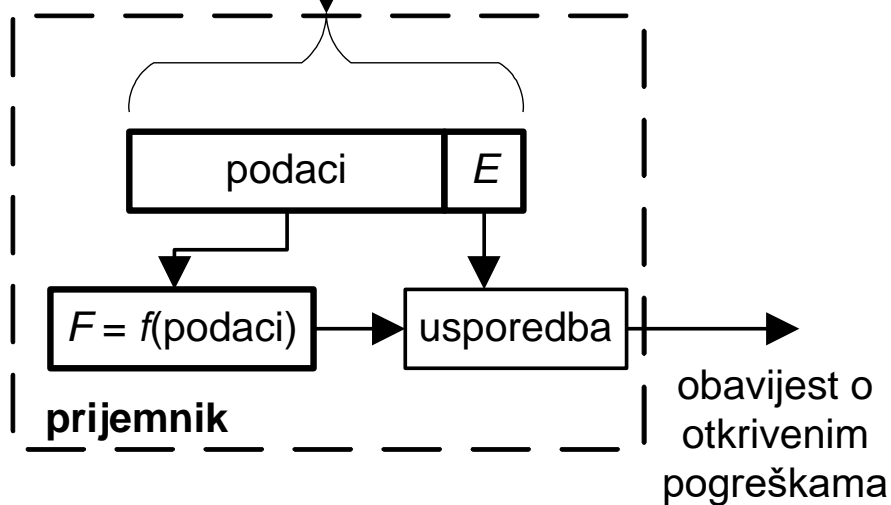
- ♦ otkrivanje pogrešaka  
ili
- ♦ ispravljanje pogrešaka

**Kodiranjem se bavi Teorija informacije!**

# Zaštitno kodiranje (2)



*podaci - k bita  
zaštita E - m bita  
na kanalu -  $n = m + k$  bita*



engl. *error detection*

## Postupak:

- ♦ predajnik kodira podatke
- ♦ **prijamnik** dekodira podatke i **otkriva** pogreške
- ♦ ispravljanje pogreške unatrag (engl. *Backward Error Correction*, BEC): prijamnik dojavljuje pogrešku **predajniku** koji ponavlja prijenos i tako **ispravlja** pogrešku

## Primjena:

- ♦ u većini mreža
- ♦ primjer: paritetni bit (otkrivanje pojedinačne pogreške), ciklički kod

engl. *error correction*

## Postupak:

- ♦ predajnik kodira podatke
- ♦ **prijamnik** dekodira podatke, **otkriva** pogrešku i određuje mjesto pogreške te je **ispravlja** - ispravljanje pogreške unaprijed (engl. *Forward Error Correction*, FEC)

## Primjena:

- ♦ teški/teži uvjeti prijenosa s većom vjerojatnosti pogreška, bez ponavljanja prijenosa (npr. Bluetooth, vozilo na Marsu)
- ♦ primjer: Hammingov kod (ispravljanje pojedinačne pogreške), konvolucijski kodovi

## Pogreška:

- ◆ oštećeni okvir (engl. *damaged frame*): okvir stiže na odredište, ali su neki od njegovih bita pogrešni
- ◆ izgubljeni okvir (engl. *lost frame*): okvir koji ne stiže na odredište

## Najčešće – ispravljanje pogrešaka unatrag:

- ◆ izvor mora saznati što se događa u prijenosu i na odredištu:
  - primljena pozitivna potvrda: primljeni okvir ispravan
  - primljena negativna potvrda: primljeni okvir s pogreškom
  - potvrda nije primljena: ?

Ograničiti čekanje na potvrdu!



## Osnovni mehanizmi:

- ◆ predajnik:
  - šalje okvir,
  - postavlja vremensku kontrolu: retransmisijska vremenska kontrola (engl. *Retransmission Time Out*, RTO) i
  - čeka potvrdu odaslanog okvira,
  - zaustavlja vremensku kontrolu po prijemu potvrde,
  - ponavlja okvir ako je potvrda negativna (primljen okvir s pogreškom) ili ako je istekla vremenska kontrola (izgubljen okvir ili potvrda).
- ◆ prijemnik:
  - potvrđuje ispravan/neispravan prijem okvira predajniku.

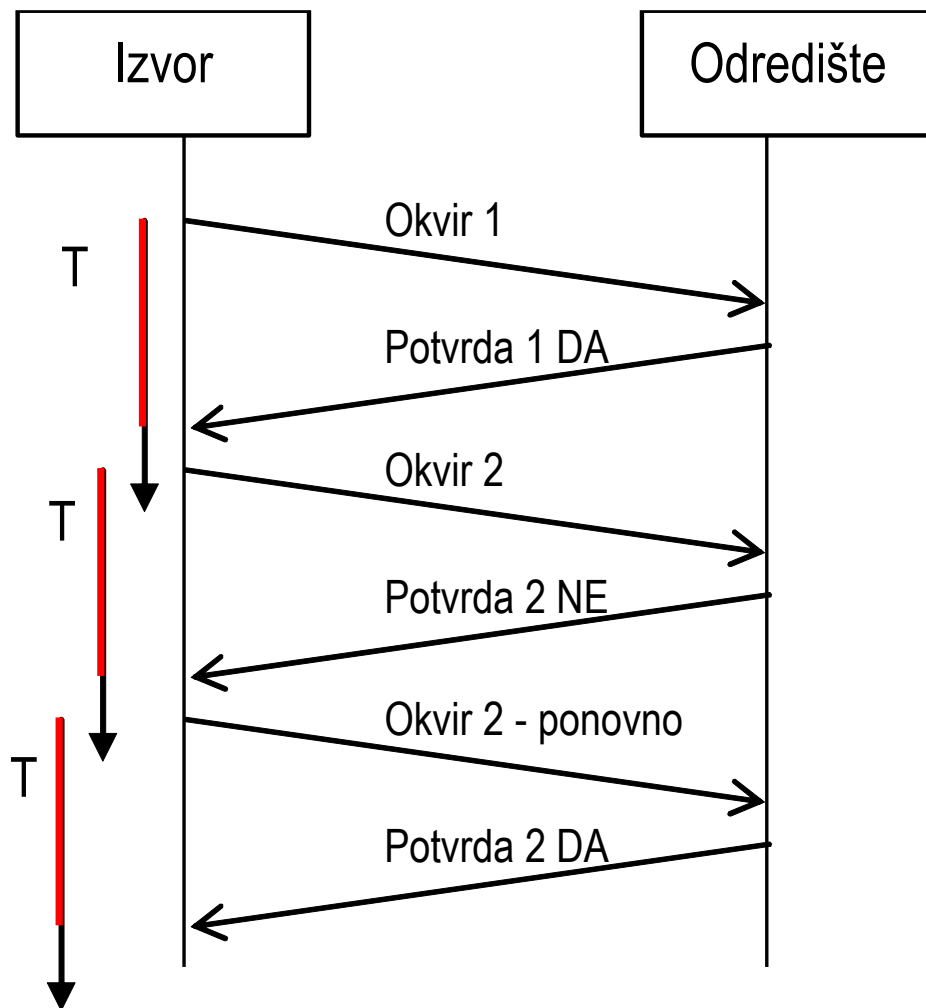
## Vremenska kontrola:

- procjenjuje se kao očekivano vrijeme potrebno da okvir dođe do odredišta i vrati se potvrda: vrijeme obilaska (engl. *Round Trip Time*, RTT)
- prekratka vremenska kontrola dovodi do prerane retransmisije okvira koji je primljen ispravno, a time i do dvostrukog (višestrukog) prijama istog okvira
- preduga vremenska kontrola dovodi do slabe iskoristivosti komunikacijskih resursa

## Višestruki prijam okvira:

- može se spriječiti numeracijom okvira slijednim brojem (engl. *sequence number*) koji omogućuje prijemniku izbacivanje okvira koji su primljeni više puta

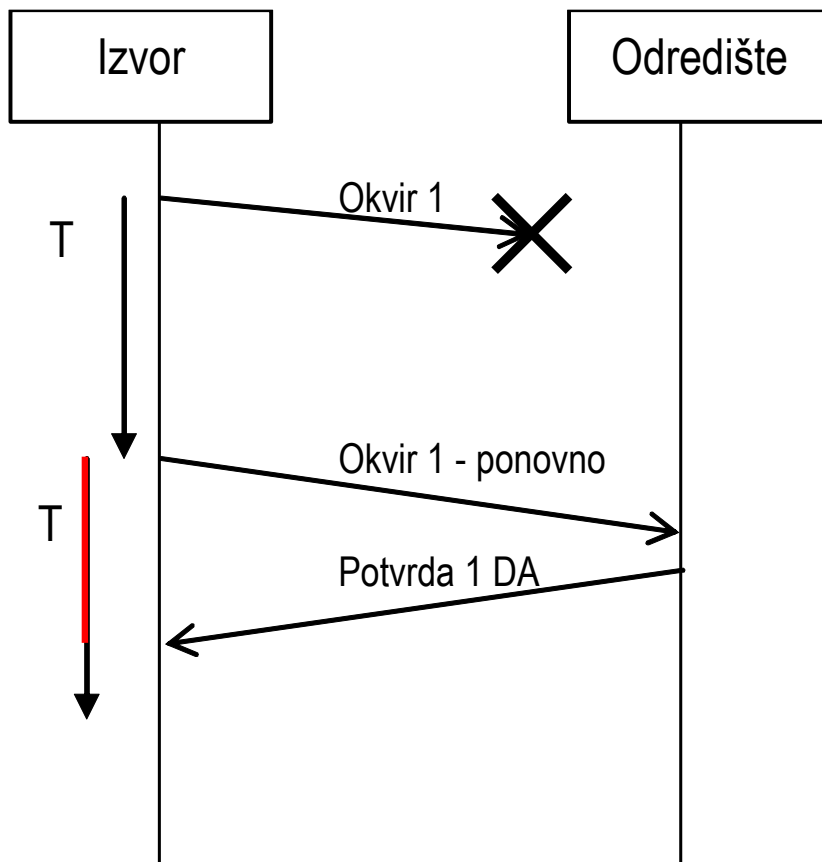
# Primjer 1



- ♦ prijenos okvira bez pogreške (DA - pozitivna potvrda ispravnog okvira)
- ♦ prijenos okvira s pogreškom (NE - negativna potvrda oštećenog okvira)
- ♦ retransmisija okvira

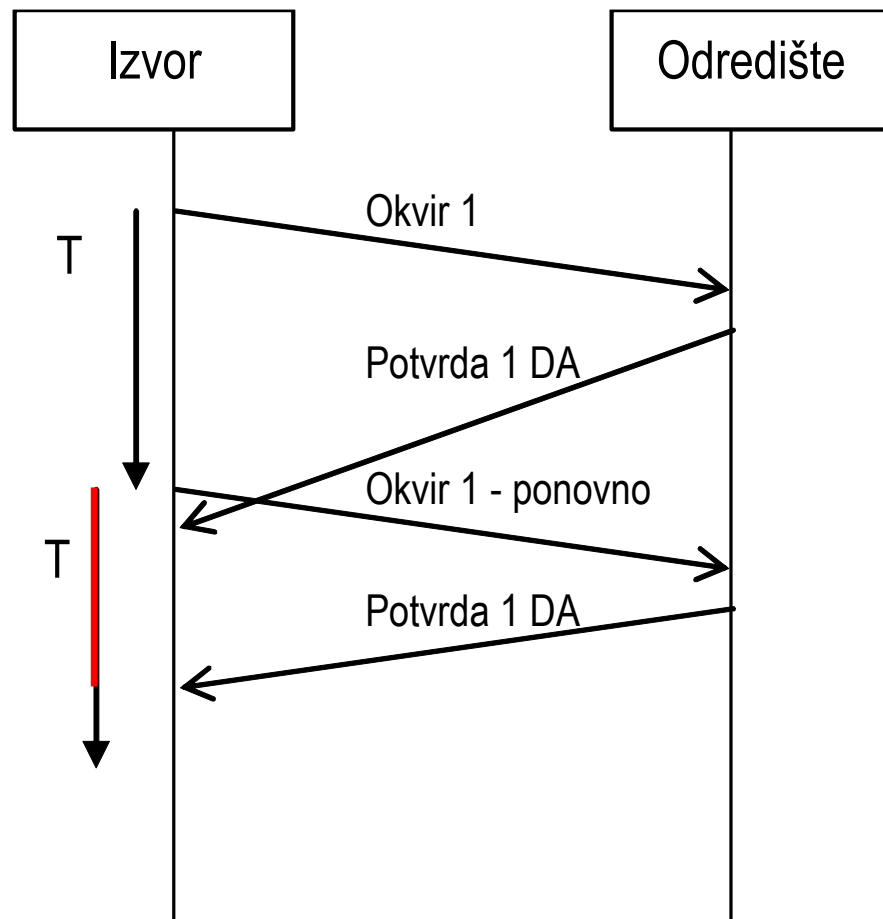
Prikaz:

slijedni dijagram  
(engl. *sequence diagram*)



- ◆ izgubljeni okvir
- ◆ retransmisija okvira nakon isteka vremenske kontrole T za prijem potvrde
- ◆ **ispravni prijam ponovljenog okvira!**

# Primjer 3



- ◆ prijenos okvira bez pogreške (pozitivna potvrda ispravnog okvira)
- ◆ istek vremenske kontrole prije primitka potvrde – prekratka vremenska kontrola!
- ◆ retransmisija okvira nakon isteka vremenske kontrole **T** za prijem potvrde
- ◆ **dvostruki prijam istog ispravnog okvira!**

engl. *flow control*

Izvor ne smije slati podatke brže nego ih odredište može primiti:

- ◆ preopterećeni prijamnik prestaje primiti podatke, što se očituje kao gubitak okvira
- ◆ predajnik treba ograničiti broj odaslanih, a nepotvrđenih okvira: potrebno brojanje okvira (**numeracija okvira**)

Osnovni mehanizam:

- ◆ upravljanje tokom zasnovano na povratnoj vezi
  - prijamnik daje predajniku dopuštenje za odašiljanje podataka

## Kako ste povezani na Internet, u stanu ili studentskom domu?

- ◆ način pristupa Internetu (modem, ADSL, kabelaška televizija, optičko vlakno ....),
- ◆ prijenosni medij
- ◆ komunikacijska mreža (javna, privatna)

## Koji se komunikacijski protokoli primjenjuju pri pristupu stranicama predmeta?

- ◆ [http://www.fer.unizg.hr/predmet/kommre\\_a](http://www.fer.unizg.hr/predmet/kommre_a)